

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE TERMINALES LOGÍSTICAS MULTIMODALES EN
AMBIENTES COMPETITIVOS: UN ENFOQUE P-HUB

KARINA GINETH LANG CAMARGO

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL
ENFASIS: INGENIERÍA DE TRANSPORTE

UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
JUNIO DE 2018

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE TERMINALES LOGÍSTICAS MULTIMODALES EN
AMBIENTES COMPETITIVOS: UN ENFOQUE P-HUB

KARINA GINETH LANG CAMARGO

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL
ENFASIS: INGENIERÍA DE TRANSPORTE

DIRECTOR: Ph. D. VÍCTOR CANTILLOMAZA

CODIRECTOR: Ph. D. HECTOR LOPEZ

UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
JUNIO DE 2018

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Contribuciones	4
1.4 Estructura de la tesis	4
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	6
2.1 Plataformas logísticas: Concepto, clasificación y características.....	6
2.2 El transporte multimodal de carga	8
2.3 Costos externos de transporte de mercancía	9
2.4 El problema de localización de facilidades tipo <i>hub</i>	14
2.5 El problema de localización de terminales multimodales	16
2.6 El problema de localización de terminales logísticas multimodales en entornos competitivos	19
3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO	23
3.1 Caracterización del modelo	23
3.2 Supuestos del modelo.....	24
3.3 Definición del modelo.....	25
3.4 Modelo matemático de ubicación de instalaciones en ambientes competitivos	27
4. CASO DE APLICACIÓN	32
4.1 Situación logística en Colombia	32
4.2 Red logística de transporte multimodal.....	35
4.3 Parámetros de entrada	38
4.3.1 Distancias y tiempos de viaje	38
4.3.2 Costos fijos de instalación.....	39
4.3.3 Costos de transbordo.....	39
4.3.4 Costos Externos.....	39
4.3.5 Factor de descuento	39
4.3.6 Flujos de carga	39
4.4 Encuesta.....	43
5. RESULTADOS	44
5.1 Modelo Logit Multinomial (MNL)	44

5.2	Modelo de ubicación de instalaciones.....	46
5.3	Análisis de sensibilidad	49
6.	CONCLUSIONES	52
	BIBLIOGRAFÍA	54
	ANEXO A. DISTANCIAS ENTRE PAR ORIGEN - DESTINO	64
	ANEXO B. TIEMPOS DE VIAJE POR MODO DE TRANSPORTE	67

1. INTRODUCCIÓN

La coordinación de las actividades de los diversos actores que forman parte de la cadena transporte y logística facilita la conformación de sistemas robustos, basados en el engranaje de procesos y la retroalimentación de información que permiten el surgimiento de esquemas de transporte multimodal, definidos en función de variables como el tipo de carga, tiempo, distancia y otras características de la red. Además, tal coordinación permite un mejor aprovechamiento de las ventajas de cada modo de transporte para lograr mayor competitividad.

Las decisiones de localización de instalaciones logísticas desempeñan un papel clave y decisivo en el diseño estratégico de las redes de la cadena de suministro y en la competitividad del transporte multimodal [1]. Los principales elementos que conforman las redes de distribución son los nodos que representan las terminales logísticas [2] y los arcos que hacen referencia a los diferentes modos de transporte por los que pueden ser enviados el flujo de carga. Su interacción es, frecuentemente, estructurada en redes tipo *hub and spoke* en los que la integración de modos de transporte permite el envío de carga entre orígenes y destinos de forma económica y operativamente viable [3].

Una red logística *hub and spoke* se compone de unas facilidades centrales (*hub*) que sirven como punto de transbordo, consolidación y clasificación de mercancía, así como punto de cambio modal en los diferentes sistemas de distribución. Los envíos entre diferentes ciudades pueden o no pasar por uno o más *hub* utilizando diferentes modos de transporte (*spoke*); por ejemplo, carretero, ferroviario, fluvial, aéreo. Las ventajas de utilización de este tipo de redes es que permite obtener economías de escala derivadas de la consolidación de mercancía y de la reducción de los costos variables de transporte entre terminales y el aprovechamiento de las capacidades de envíos en términos de peso, volumen y tiempos de acceso y tránsito [4].

El problema de localización de terminales logísticas implica la ubicación de las instalaciones *hub* a través del cual los flujos de mercancías son ruteados desde el origen hasta el destino. La asignación de los nodos que no son escogidos como *hub* a las instalaciones elegidas y el ruteo del flujo de mercancía se distribuyen a través de la red. En este sentido, los flujos de mercancía enviados de cada nodo de origen son clasificados y consolidados en los nodos *hub*

de acuerdo al nodo destino y, posteriormente, distribuidos hacia los mismos. Considerando lo anterior, una terminal logística debe estar ubicada en puntos estratégicos donde se lleven a cabo intercambios modales y rupturas de carga que permitan realizar una serie de operaciones que rentabilicen el proceso e incrementen el valor de la misma.

El enfoque principal de este trabajo es el desarrollo de un modelo de ubicación de terminales en redes logísticas multimodal bajo el enfoque *p-hub* considerando competencia entre las alternativas. El diseño de la red multimodal implica identificar el número y la ubicación de las instalaciones logísticas y la asignación de los envíos que pueden ser atendidos por cada *hub*. En esta investigación, una terminal logística es concebida como un área especializada que está conformada por áreas de almacenamiento, áreas multifuncionales e infraestructura de transporte que sirve como intermediario en la transferencia de producto y la cadena de transporte y a la cual se puede tener acceso por carretera, tren o río.

En el modelo, la elección del modo de transporte para el transporte de la carga asignada a cada alternativa entre cada par origen – destino está determinada por un proceso de elección estocástico en el que, a partir de atributos como el costo y el valor del tiempo de transporte, se estima la atracción de carga de cada facilidad. Se planteó que el envío de carga entre pares origen – destino puede ser realizado por envío directo, haciendo uso de una terminal logística en la que no se presenta descuento *inter-hub* pero que contempla un descuento por el uso de la red multimodal y utilizando un *par hub* que permite economías de escala y que se presenta como un factor de descuento en el costo de transporte entre las terminales escogidas, permitiendo comparar entre los costos totales haciendo uso de una red de transporte convencional (carretera) y los costos totales utilizando una alternativa multimodal.

El modelo usado en esta investigación minimiza los costos sociales de una red de transporte de carga considerando costos internos: instalación, tiempo, operación, conectividad modal y costos externos asociados a los impactos ambientales de las operaciones de transporte. Estos costos son utilizados como compensación entre la apertura de nuevas instalaciones y la reducción de los costos logísticos totales.

1.1 Objetivos

El objetivo de esta investigación es formular un modelo estratégico para la ubicación de terminales logísticas siguiendo el enfoque *p-hub* en ambientes competitivos considerando procesos de elección estocásticos involucrando costos sociales. Para la consecución del objetivo fue necesario:

- Desarrollar modelos de comportamiento basados en elecciones discretas que involucren variables relevantes como los costos de transporte, costos de trasbordo y costos del tiempo de viaje.
- Proponer un modelo para la ubicación de instalaciones logísticas considerando la competencia entre las rutas alternativas, minimizando costos sociales.
- Aplicar el modelo propuesto para resolver un problema de diseño de redes logísticas multimodales en la vida cotidiana utilizando datos reales provenientes de encuestas a transportadores de carga y datos simulados provenientes de herramientas de cálculo de costos y tiempos de viaje.
- Realizar un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar el impacto de considerar factores de escala y mejoras en las redes de transporte existentes en el costo de transporte y en la elección de instalaciones.

1.2 Hipótesis

Esta investigación se basará en la hipótesis de que es posible desarrollar un modelo de localización para la instalación de terminales logísticas que funcionen como “*hub*” con el fin de masificar flujos, incrementar eficiencia y optimizar la distribución de carga en ciertas regiones de demanda, incorporando el carácter estocástico de los procesos de elección por parte de los actores de la cadena logística, cuya función objetivo minimiza costos sociales. Además, se planteó la hipótesis que los exportadores e importadores pueden elegir entre el uso de una red multimodal que incluye la instalación de terminales logísticas o el transporte logístico directamente al puerto/centro de consumo como función de los costos generalizados percibidos asociados a cada alternativa

1.3 Contribuciones

Las principales contribuciones de esta investigación a la literatura son:

- Desarrollo y aplicación de un modelo matemático para resolver el problema de diseño de redes logísticas multimodales tipo *hub* incorporando modelos *logit* para representar el comportamiento de competencia entre las alternativas, minimizando costos sociales.
- Desarrollo de un análisis de sensibilidad para identificar los efectos de los diferentes parámetros sobre el esquema de la red logística multimodal bajo el enfoque *p-hub*.
- Análisis comparativo entre la estructura de costos de la red logística con transporte directo haciendo uso de las redes de transporte convencional (carretera) versus los costos de la red logística utilizando facilidades tipo *hub* con oportunidades de transporte multimodal.

1.4 Estructura de la tesis

Este documento se encuentra organizado como se describe a continuación:

- Capítulo 2: Se discute el planteamiento del marco conceptual en el contexto de redes logísticas multimodales bajo el enfoque *p-hub*. En este capítulo se presenta la revisión de diferentes estudios sobre conceptualización y clasificación de plataformas logísticas, así como, la literatura asociada con modelos para la ubicación de terminales logísticas multimodales incluyendo entornos competitivos.
- Capítulo 3: Se enfoca en la descripción y formulación matemática del modelo de ubicación de instalaciones logísticas incluyendo la formulación del modelo de elección discreta utilizado para determinar la proporción de flujo de cada alternativa.
- Capítulo 4: Muestra los resultados del modelo de comportamiento tipo *logit* para conocer la probabilidad de elección de cada una de las alternativas planteadas como posible ubicación de las terminales logísticas. Además, se presenta el caso de aplicación del modelo de programación no lineal entera mixta para la ubicación de terminales logísticas propuesto a una red logística multimodal en Colombia, así como el análisis de sensibilidad de los parámetros y el análisis comparativo en la estructura

de costos de redes logísticas. Finalmente, presenta el análisis de sensibilidad realizado en el que se consideraron variaciones en la demanda, en el número de terminales a escoger y en parámetros como la velocidad del río.

- Capítulo 5: Describe las conclusiones y recomendaciones de la investigación en donde, a partir de los resultados encontrados, se formulan propuestas para posteriores investigaciones, propuestas para la implementación de terminales logísticas a nivel nacional y políticas que contribuyan a la mejora de la situación logística del país.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En esta sección se presenta una revisión de la literatura acerca del diseño de redes logísticas multimodales considerando ambientes competitivos bajo el cual se enmarca la presente investigación. La literatura presentada en este documento hace énfasis en los conceptos y modelos para resolver el problema de ubicación de *hubs* en el contexto de redes logísticas que incluyen más de un modo de transporte como alternativas para la distribución de mercancías.

2.1 Plataformas logísticas: Concepto, clasificación y características

A pesar que el concepto de plataforma logística ha sido ampliamente utilizado [5], en la literatura, los autores emplean el término en una diversidad de contextos y no hay unanimidad acerca de cómo debe ser una plataforma logística que contribuya al desarrollo económico regional [6].

Conceptualmente, la *Asociación Europea de Centros de Transporte de Mercancías – Europlatform* ofrece la mejor definición [7], [8] indicando que una plataforma logística es “*un área definida, dentro de las cuales se ejerce por diferentes operadores, todas las actividades relacionadas con el transporte, la logística y la distribución de mercancías, tanto para el tráfico nacional, como para el internacional. Su gestión puede ser pública o privada y en ambos casos se podrá contar con los servicios públicos requeridos para prestar sus servicios*”.

Duarte [9], como resultado de sus estudios, expresa que una plataforma logística está conformada por tres sub-áreas funcionales. Ellas son:

- Sub-área de Servicios Generales: Como su nombre lo indica, en esta área se incluyen servicios comunes que se prestan a las diferentes empresas que se instalan en la plataforma logística tales como: recepción, alojamiento y alimentación, bancos, agencias de viajes, áreas de estacionamiento, suministro y reparación, servicios de aduanas y administración.
- Sub-área de Transporte: Esta área corresponde a la agrupación de las principales áreas de infraestructura de transporte. Es muy importante aclarar que el carácter de la

plataforma es multimodal y, por lo tanto, tiene terminales multimodales que faciliten la integración del transporte por carretera, ferroviario, marítimo y/o aéreo.

- Sub-área destinada a operadores logísticos: En esta área se brindan las condiciones para la prestación de servicios de fletamento, comercio y servicios de asesorías de aduanas, alquiler de equipos, almacenamiento, transporte y distribución.

Dentro de la clasificación de plataformas logísticas [8] se pueden distinguir tres diferentes tipos acorde a la complejidad e integración de las operaciones: centros de distribución unimodales, zonas logísticas y plataformas logísticas multimodales. El primer tipo corresponde a infraestructura dedicada al almacenamiento y a la gestión del flujo de mercancías en el eslabón final de la cadena de suministro y del inventario asociado. En este tipo de operaciones puede participar una o más empresas sin exigir algún grado de integración de operaciones. Este tipo de infraestructura es típicamente unimodal y principalmente orientado al transporte terrestre por carretera. El segundo tipo hace referencia a centros de carga aérea o zonas de actividades logísticas portuarias en donde se requiere un mayor grado de integración de operaciones mediante actividades de consolidación, localización y re-direccionamiento de inventarios. En estas infraestructuras logísticas se presenta concentración de tráfico, ruptura de carga y servicios de valor agregado (*crossdocking*), permitiendo la conexión con otros puntos a través de un modo de transporte distinto. Y, por último, las plataformas logísticas multimodales que corresponden a nodos logísticos que conectan diferentes modos de transporte y lo primordial son los servicios de valor agregado a las actividades logísticas y a la carga. Este tipo de infraestructura se conoce también como infraestructura tipo *hub*, cuya implementación está relacionado con la existencia de un puerto con el propósito de aprovechar economías de escala en las rutas internacionales.

Acorde a diferentes estudios realizados en donde se comparan algunas plataformas logísticas en España, Italia y Dinamarca [5], los principales atributos que caracterizan a las mismas son la ubicación en zonas que tengan fácil acceso a los diferentes modos de transporte, el servicio eficaz y eficiente aumentando la flexibilidad de las operaciones y reduciendo costos; y la participación del sector público, que resulta fundamental para la aplicación y el éxito de la plataforma, asumiendo el papel de promotor, articulador y regulador de la inversión a través

del desarrollo de la infraestructura y / o proporcionar incentivos para la adhesión por parte del sector privado necesario y gestión centralizada, que es crucial para asegurar el control de las operaciones y estrategias de las empresas.

2.2 El transporte multimodal de carga

Como se mencionó anteriormente, una de los principales atributos de una plataforma logística es la oportunidad que brinda para que se desarrollen operaciones en donde se presente ruptura de carga y se integren diferentes modos de transporte.

El transporte multimodal de mercancías es definido como *“el movimiento de bienes en una misma unidad de carga o vehículo a través de diversos y sucesivos modos de transporte sin la manipulación de los bienes durante la transferencia de modos”* (European Conference of Ministers of Transport, 1993).

A pesar que este tipo de sistemas de transporte requiere realizar una inversión para la construcción y mantenimiento de las terminales logísticas e implica tiempos y costos de transbordo, la sincronización y eficiencia en las operaciones desarrolladas hacen que este tipo de terminales sean exitosas y ampliamente utilizadas para el transporte de mercancías. Adicionalmente, el bajo impacto ambiental ocasionado, en términos de CO₂ y de otros gases peligrosos, hace que el sistema resulte más atractivo frente a la alternativa de transporte carretero debido a que las emisiones de CO₂ de ferrocarriles y barcazas son mucho menores a las emisiones producidas por los camiones.

El principal objetivo del transporte multimodal es consolidar cargas en los núcleos de la red, es decir, en las terminales logísticas donde los flujos de materiales y proveedores se reúnen e interactúan [10] para lograr eficiencia en el transporte a larga distancia mientras se aprovecha la eficiencia de las operaciones de transporte local [11].

Como se observa en la Figura 1, el sistema de transporte multimodal está dividido en tres segmentos: la recolección, el transporte principal y distribución de mercancías. El primero hace referencia a la logística de primera milla que, por lo general, se realiza en transporte por carretera. El segundo corresponde al transporte entre las terminales que conectan los modos de transporte [12] y puede ser realizado por tren, barcaza, entre otros. Y el último eslabón es

la logística de última milla que se realiza para el proceso de entrega y, usualmente, es realizado por transporte carretero[13].

El costo de transporte multimodal está constituido por los costos de los diferentes servicios en la cadena de transporte como son: costos de envíos, transbordos, almacenamiento, entre otros. A pesar de los costos señalados anteriormente, la ventaja de este tipo de transporte consiste en la reducción de los costos variables en el transporte principal como resultado de las economías de escala que se obtienen al aprovechar las grandes capacidades ofrecidas por el transporte en barcaza en comparación con el transporte por carretera [14]–[17].

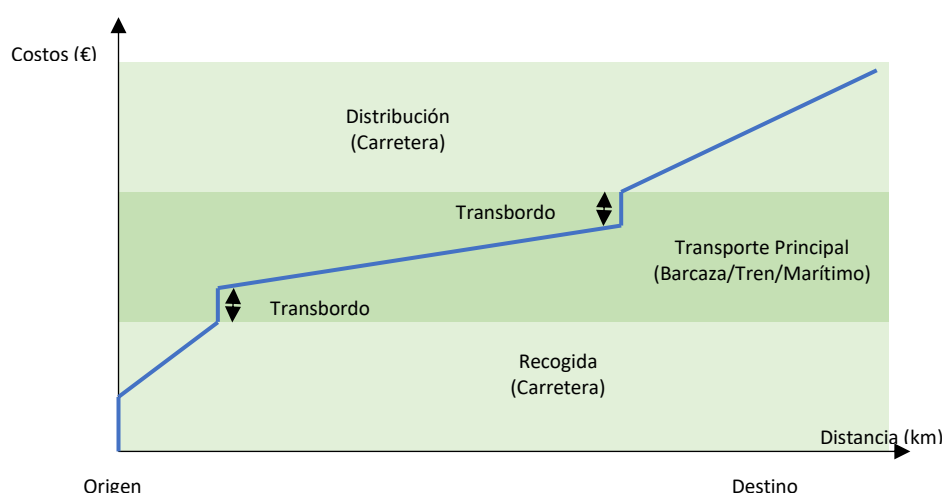


Figura 1. Costo de transporte multimodal
Fuente: [15]

2.3 Costos externos de transporte de mercancía

El análisis de los costos totales de una red de transporte, unimodal o multimodal, requiere entender los distintos componentes del sistema: tamaño de la red, tipo de operaciones, tecnologías y, en especial, los costos internos y externos [18]. Los costos internos son aquellos que percibe el usuario tales como los costos del tiempo y operación mientras que los costos externos son los costos que las redes imponen a la sociedad y que no son percibidos por los usuarios [19], [20]. Los principales costos externos derivados del transporte de mercancía en los diferentes modos son: accidentes, emisiones, cambio climático, ruido, daños en la infraestructura y congestión en el caso de transporte en áreas urbanas [21]. En las actividades de transporte de carga, la optimización de estos costos requiere de acciones

simultáneas entre diferentes actores públicos y privados, así como una estrecha cooperación entre las partes interesadas para crear sinergias [22].

En la literatura diferentes trabajos han sido desarrollados para determinar el impacto de la internalización de los costos externos de transporte [23]–[25]. Forkenbrock [26] compara los costos externos para transporte de carga carretero y ferroviario. El análisis fue realizado para cuatro tipos de trenes: tren de unidades pesadas, tren mixto, tren multimodal, tren de contenedores de doble arrume. Como resultado, presentan que los costos externos del transporte por carretera es cuatro veces el costo externo del transporte ferroviario. Beuthe et al. [27] presentan los resultados obtenidos de una modelación de la red de transporte multimodal de transporte de mercancías en Bélgica. En este estudio realizan una simulación de los flujos de la red interurbana belga en el año 1995 y estiman costos externos como contaminación, congestión, ruido y accidentes, así como de los daños de carreteras por camiones. Como conclusión expresan que, con el uso de redes multimodales de carga, el costo por congestión disminuye un 44%, los costos por accidentes se reducen un 24%, los costos por ruido disminuyen en un 20%. A su vez, Kreutzberger et al. [28] realizaron una revisión de los diferentes estudios que incluyen los costos de externalidades y su impacto en el transporte de mercancía en redes unimodales e multimodales. En la revisión, expresan que los costos externos del transporte de mercancías por carretera de larga distancia duplican los del transporte por ferrocarril y son entre 5 y 6 veces más que los costos por transporte en barcaza y el transporte marítimo de corta distancia. Los mayores costos externos del transporte por carretera son las emisiones (33%), la congestión (23%) y los accidentes (22%). La externalidad del transporte ferroviario con mayor costo corresponde a las emisiones locales (31%), seguida por el ruido y la infraestructura (28% y 23%, respectivamente). Para el transporte de barcasas y de transporte marítimo de corta distancia, el mayor costo externo es las emisiones locales (60% y 50%, respectivamente). El trabajo realizado por Janic [18] desarrolló un modelo para calcular los costos totales para redes de transporte multimodal y de transporte de mercancías por carretera aplicado a la red de transporte en Europa. Para ambas redes de transporte, los costos internos fueron los costos operativos y costos de tiempo y los costos externos fueron los costos de los impactos sobre la sociedad y el medio ambiente, tales como la contaminación atmosférica, la congestión, el ruido y los accidentes. Los costos asociados a estas externalidades en transporte carretero fueron determinados en función de

la distancia recorrida (d) como $€9.88d^{-0.624}$ vehículo – km mientras que para el transporte ferroviario fueron estimados en función del peso bruto (ws) como $€0.58(ws)^{-0.6894}$ tren. El costo de las externalidades en las terminales multimodales fue definido como el costo de la contaminación atmosférica debido a la generación de energía para el movimiento de los equipos utilizados para las operaciones de transbordo de las unidades de carga el cual fue estimado en €0.0549 tonelada. El estudio concluye que los costos totales de ambas redes disminuyen a medida que aumenta la distancia de envío puerta a puerta, además presenta que, para la red de transporte multimodal, los costos totales medios disminuyen a medida que aumenta la cantidad de cargas mientras que en la red de transporte por carretera estos costos son constantes. Otro relevante avance fue el logrado por Sahin et al. [29], quienes realizaron un modelo de análisis de costos para el transporte de carga y pasajeros en el que emplearon diversos parámetros técnicos, económicos y operacionales, incluyendo costos externos. Las externalidades evaluadas por cada modo de transporte fueron los accidentes, emisiones y ruido. El modelo fue aplicado a la red de transporte de carga de Turquía y concluyeron que a medida que aumenta el tamaño de la carga disminuyen los costos de transporte, los costos de transporte por carretera se ven afectados por el tamaño de envío de carga y por la distancia recorrida siendo este atractivo en cortas distancias y, en el transporte marítimo, la reducción de costos se hace evidente cuando se transportan grandes cantidades a largas distancias. Iannone [22] examinaron los posibles efectos sobre los flujos de contenedores internos y sus costos internos y externos asociados debido a las iniciativas públicas y privadas en el campo de la logística de contenedores portuarios. El estudio fue aplicado a los puertos marítimos de la región de Campania en el sur de Italia y concluyeron que la internalización de los costos externos en los precios del transporte puede conducir a un mayor uso de los servicios ferroviarios entre los aeropuertos regionales y los lugares extra-regionales, lo que representa un ahorro de costos totales entre 3,22% y 3,27% mientras que el ahorro externo total oscila entre 12,64% y 14,82%. En Bélgica, Santos et al. [30] presentaron un modelo de localización – asignación para analizar el impacto que tienen las políticas de transporte en el transporte multimodal. Para esto, estudiaron cuatro (4) escenarios: 1) presentaron la situación actual: terminales existentes y subsidios del gobierno; 2) evaluaron las terminales existentes, pero no incluyeron los subsidios a fin de determinar el impacto que tienen estos en el transporte de carga; 3) la ubicación de las terminales existentes cambió, incluyeron subsidios y el hecho

de que las terminales ferroviarias pueden situarse en el centro de generación de cualquier región del país. Este les permitió analizar la ineficiencia potencial del sistema de transporte fijo dada la ubicación actual de los terminales; 4) incluyeron costos externos a los costos operativos y los subsidios. Los costos usados en el modelo estuvieron basados en los estudios realizados por [18]. A través de un análisis de regresión determinaron que el costo externo de transporte carretero en distancias larga fue de $\text{€}0.4845d^{-0.6235}/\text{ton} - \text{km}$ y para distancias pequeñas fue de $\text{€}0.6864d^{-0.6235}/\text{ton} - \text{km}$ mientras que, para el transporte ferroviario, el costo de las externalidades estuvo determinado por la siguiente expresión, donde l_{jk} corresponde a la distancia entre las terminales j y k : $R_{jk}^e = 0.001696l_{jk} + 0.0015 \left(\frac{l_{jk}}{\ln(l_{jk})} \right)$. Como resultado de lo anterior, concluyeron que los subsidios tienen un impacto significativo en los volúmenes transportados por el transporte multimodal y, en menor medida, que la optimización de la ubicación de los terminales aumenta la competitividad del transporte multimodal. Además, discutieron que la internalización de los costos externos puede afectar negativamente a la promoción de la multimodalidad por lo que indican que se mejore el transporte de última milla para reducir los impactos externos de las operaciones de transporte a corta distancia. Mientras tanto, Zhang & Li [31] presentaron diferentes métodos para estimar los costos externos en China. Los costos analizados fueron los relacionados con contaminación ambiental, ruido, accidentes y gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos muestran que los costos externos de transporte por carretera son casi 8 veces los costos externos de transporte por ferrocarril. Por su parte, Ambrosino et al. [24], evaluaron parámetros como modos de transporte, costos de operación, distancias y costos externos para determinar las ubicaciones potenciales de los puertos interiores en Italia que podrían atender a un mercado a través de diferentes alternativas. En el modelo propuesto, se comparan diferentes redes logísticas multimodales de carga: ferroviarias y carreteras, con el fin de explicar el impacto del uso de puertos interiores en el intercambio modal del transporte de mercancías. Los resultados mostraron que, al internalizar los costos externos, la distribución modal podría ser más equilibrada entre las alternativas de transporte estudiadas, incluso incrementando la participación del tren hasta un 33%. Cabe destacar que una de las soluciones óptimas encontradas por este modelo es similar a los resultados obtenidos por [32] en el que concluyeron que el puerto de Milán podría ser un terminal ferroviario óptimo en la

red de transporte de mercancía del país. Mostert et al. [33] desarrollaron un modelo bi-objetivo con el propósito de minimizar los costos de operación y los costos ambientales en redes de transporte carretero y redes multimodales con tres modos de transporte (carretera, ferrocarril y fluvial) considerando economías de escala.

En Colombia, Márquez y Cantillo [34] realizaron la modelación estratégica de transporte de carga en Colombia incluyendo entre los costos internos, el del tiempo y el de operación, y entre los costos externos, la congestión, accidentes, polución del aire y emisiones de dióxido de carbono (CO₂). En el estudio concluyeron que el promedio de los costos externos es de 0.014 US\$/ton-km para carreteras, 0.000105 US\$/ton-km para transporte fluvial y 0.0016 US\$/ton-km para ferrocarril.

Una revisión general del estado del arte acerca los costos externos, comparación de estos entre transporte unimodal e multimodal y su impacto en la competitividad de transporte es presentado en [35], [36]. En la Tabla 1 se presentan algunas referencias de los costos marginales externos encontradas en la revisión de la literatura.

Tabla 1. Costos marginales externos (€/ton – km)

Modo de Transporte	Accidentes	Congestión	Emisiones	Ruido
Carretera				
1	0,00937	0,02108	0,0182	ND
2	0,0054	0,0055	0,0079	0,0021
3	0,0033	ND	0,00045	0,00022
4	0,0008	0,0094	0,0051	0,0039
5	0,0033	ND	0,0104	0,0012
Tren				
1	0,00243	ND	0,00503	ND
2	0,0015	0,0002	0,0038	0,0035
3	0,0004	ND	0,00011	0,00015
4	0,0001	0	0,0007	0,0024
5	0,0001	ND	0,0011	0,0008
Fluvial/Marítimo				
1	0	0	0	0
2	0	0	0,003	0
3	0,000005	ND	0,000385	0
4	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND

Fuente: 1. [27]; 2.[28]; 3.[29]; 4.[22]; 5. [31]

2.4 El problema de localización de facilidades tipo *hub*

El problema de localización de facilidades tipo *hub* se trata de la ubicación de instalaciones tipo *hub* y del ruteo de los flujos que pasa a través de ellos entre pares origen-destino [37]. Goldaman [38] introdujo el concepto de *hub* en redes de transporte como un tipo de instalación especial diseñado como un punto de intercambio de flujo de mercancía, sin embargo, O'Kelly [39]–[41] presentó las primeras formulaciones matemáticas expresadas en modelos en el que el costo de transporte es minimizado ubicando instalaciones (nodos) conectadas a p *hubs* interconectables entre sí, como se muestra en la Figura 2.

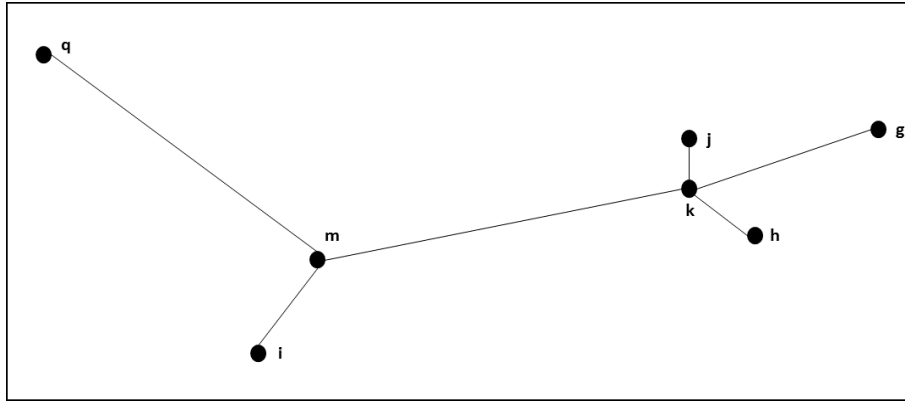


Figura 2. Red hub – spoke sencilla
Fuente: [41]

Luego, propuso la primera formulación entera cuadrática para resolver el problema de p -hub median con asignación simple [41] tal como se muestra a continuación:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j W_{ij} \left(\sum_k X_{ik} C_{ik} + \sum_m X_{jm} C_{jm} + a \sum_k \sum_m X_{ik} X_{jm} C_{km} \right) \quad (1)$$

Sujeto a

$$(n - p + 1)X_{jj} - \sum_i X_{ij} \geq 0, \forall j \quad (2)$$

$$\sum_j = 1, \forall i \quad (3)$$

$$\sum_j X_{jj} = p \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

En la formulación matemática presentada anteriormente, W_{ij} hace referencia al flujo de carga entre los nodos i y j , C_{ij} representa el costo de transporte entre los nodos i y j , X_{ik} es una variable binaria que toma el valor de 1 si el nodo i está vinculado con el *hub* k y 0 en otro caso, X_{ii} es una variable binaria que toma el valor de 1 si el nodo i es un *hub* y 0 en otro caso y el parámetro a refleja el efecto escala de la interacción de flujos entre las facilidades k y m .

Posteriormente, Campbell [42] desarrolló formulaciones matemáticas para resolver, especialmente, cuatro tipos de problemas de optimización discreta: el problema del *p-median*, el problema *p-hub center*, el problema de ubicación de instalaciones con costos fijos y el problema *hub covering*. Dentro de estos modelos desarrolló una formulación lineal para el modelo planteado por [41] y expresó que los problemas de ubicación de *hub* se pueden clasificar por la forma en que se asignan los puntos de demanda a los *hub* destacando dos estructuras de asignación: asignación simple o asignación múltiple.

En el caso de asignación simple [43]–[47], cada nodo que no es asignado como *hub* es asignado a un único *hub* seleccionado mientras que en la asignación múltiple [48]–[52], el flujo procedente o destinado a un nodo pueden ser transferidos a través diferentes pares de *hub*.

Posteriormente, se han desarrollado nuevas formulaciones para el problema de asignación simple [53], [54] y asignación múltiple [51], [54]–[57] que incluyen menor número de variables y restricciones que las utilizadas tradicionalmente en la literatura y diferentes atributos como costos fijos y variables en los costos de transporte.

En investigaciones más recientes, Dinler [58] presentaron modelos de programación matemática simple, modelos NP-hard y modelos de heurísticas para resolver el problema de ubicación de instalaciones y asignación múltiple en donde las demandas son regiones en lugar de nodos asumiendo que cada instalación tiene una capacidad ilimitada y puede manejar todos los clientes que se le asignen.

Por otro lado, Gelareh et al [59] desarrollaron un modelo de localización de *hub* multi-periodo, en sistemas de transporte, donde la ubicación del *hub* puede cambiar a lo largo del horizonte de planificación en respuesta a las fluctuaciones de la demanda y los costos de un

período a otro. Para esto un plantearon un modelo de programación lineal entera mixta, bajo el enfoque de solución meta-heurística con procedimientos de diversificación e intensificación. Los resultados mostraron que la heurística es muy eficiente en la producción de soluciones de alta calidad en una cantidad aceptable de tiempo. Entretanto, Zhang et al. [60] plantearon un modelo de diseño de red de transporte de mercancías incorporando múltiples modos, múltiples productos, diversos actores y las redes de servicios desde la perspectiva del gobierno. A su vez, Alibeyg et al. [61] consideraron un problema de diseño de redes tipo *hub* con beneficios orientados al objetivo. Simultáneamente consideraron la optimización de los beneficios obtenidos, el costo de instalación de la red y los costos de transporte tomando como medida la compensación entre el beneficio de los productos que son servidos y el diseño de la red en general y los costos de transporte.

Los trabajos realizados por [62]–[64] presentan amplias revisiones de la literatura donde relacionan modelos, metodologías y aplicaciones de localización y asignación de facilidades tipo *hub* en la solución de problemas grandes, topologías de redes alternativas, integración de costo y servicio, modelos dinámicos, modelos de competencia y modelos con elementos estocásticos y consideraciones de confiabilidad.

2.5 El problema de localización de terminales multimodales

El desarrollo de modelos de transporte multimodal de carga ha sido uno de los temas de investigación desarrollados durante las tres últimas décadas [65], en donde diversos estudios incluyen decisiones de ubicación de facilidades tipo *hub* como criterio decisivo al momento de diseñar redes multimodales.

El problema de localización de terminales logísticos multimodales es un caso especial del problema de ubicación de *hub* [66], donde cada uno funciona como terminal de transbordo que recibe y agrega flujo de diferentes orígenes y envía a diferentes destinos, permitiendo reducir los costos fijos de instalación y los costos operativos [67].

Este tipo de problema tiene como objetivo determinar las ubicaciones de terminales y asignación de rutas dentro de una red de transporte unimodal o multimodal con el fin de minimizar el total de los costos de transporte y operación [68], sin embargo, en el caso de

terminales multimodales se necesita identificar el cambio de modo óptimo para el transbordo entre las instalaciones tipo *hub* [69].

La aproximación realizada por Lin et al [70] presenta cuatro características que permiten diferenciar el problema de localización de terminales multimodales, ellas son: primero, el número de terminales no es fijo y depende de los costos totales; segundo, cada terminal tiene un costo y una capacidad asociada a su instalación; tercero, cada par origen – destino puede recibir y enviar carga a múltiples terminales y, por último, la carga puede ser enviada directamente o a través de nodos escogidos como *hub*.

Las redes utilizadas para la localización de terminales incluyendo transporte multimodal suelen ser representadas en un grafo $G(N, A)$ donde los nodos representan los puntos de generación y atracción de carga y los arcos representan los diferentes modos de transporte disponibles en la red [71]. Dentro de los nodos que figuran en el grafo se encuentran nodos *hub* los cuales serán localizados y nodos *non-hub* que serán asignados a los nodos *hub*. Los nodos *hub* son instalaciones que concentran flujos de mercancía procedentes de los nodos *non-hub* y permiten conexiones entre diferentes modos de transporte lo que genera ahorros por economías de escala, facilita el transbordo de carga y conmutación de flujos entre orígenes y destinos especificados [62], [72].

Para determinar la ubicación óptima de nodos *hub* deben tenerse en cuenta diferentes factores como la ubicación de los nodos de oferta y la demanda, los flujos de mercancía entre dichos nodos, los costos de transporte, el tiempo y nivel de servicio, los costos de instalación del *hub*, la conectividad con diferentes modos de transporte y las economías de escala [73], [74]. Sin embargo, en ambientes competitivos también se deben considerar las decisiones de las otras firmas y preferencias de los clientes [75].

Arnold et al.[76] aplicó un modelo de programación lineal entera para determinar la ubicación óptima de terminales de carga de contenedores en un sistema de transporte bimodal conformado por el ferrocarril y la carretera. Por su parte, Racunica & Wynter [77] diseñaron un modelo de ubicación óptima con el objetivo de aumentar la cuota de mercado del modo ferroviario en una red *hub-and-spoke* basado en el problema de localización de *hub* sin restricciones. Limbourg y Jourquin [32], también determinaron la ubicación óptima de terminales para contenedores en una red multimodal *hub-and-spoke*, esta vez usando un

modelo de *p-hub median* con asignación simple considerando variables como el costo de transbordo y los costos de transporte, además, de la distribución de flujos entre puertos. Ishfaq y Sox [4] plantearon un modelo *p-hub median* para la interacción ubicación – asignación de *hub* en una red logística multimodal interregional operada por un proveedor de servicios logístico. En el modelo se incluyeron parámetros como diferentes tipos de envíos, diferentes modos de transporte, costos de transbordo, economías de escala y tiempos de servicio. Seguidamente, Ishfaq y Sox [78] discutieron un modelo para resolver el problema de la *p-hub median* con asignación múltiple permite conexión entre diferentes modos de transporte y engloba costos de transporte, costos de conectividad modal, costos fijos de instalación y restricciones de tiempo de servicio en una red multimodal (ferrocarril – carretera). Meng & Wang [69] plantearon un nuevo modelo para el diseño de redes con múltiples modos para el flujo de múltiples tipos de contenedores incluyendo diversos grupos de interés, diferentes tipos de contenedores y procesos de transferencia en cada *hub*. A su vez, Vasconcelos et al. [79] discutieron una nueva formulación de programación entera para resolver el problema de localización de *hub* sin restricciones bajo gestión descentralizada en donde expresan que una gestión descentralizada necesariamente funciona acorde a un sistema de asignación múltiple. El modelo fue aplicado a una red de transporte de carga multimodal en Brasil. La investigación conducida por Sörensen et al. [68] desarrolló dos metaheurísticas como herramienta rápida y efectiva para tomar decisiones con relación al problema de ubicación de terminales propuesto por [1]. Alumur et al. [74] propusieron un modelo de programación lineal entera mixta para la localización de *hub* con asignación simple considerando costos de transporte y tiempos de viaje. Además, relajan el supuesto de red completa, permiten múltiples modos de transporte y diferentes tipos de niveles de servicio para los clientes. Por su parte, Ishfaq y Sox [80] exploraron el efecto de escasez de recursos y la variabilidad del tiempo del tránsito modal en el diseño de redes *hub* bajo restricciones de tiempo de servicio. Para esto desarrollaron un modelo *p – hub median* con asignación múltiple integrado a un sistema de colas con diferentes productos y rutas determinísticas con el cual se obtuvieron tasas de tráfico y variabilidad en los tiempos de espera promedio de envío en la red logística. En la misma línea, Lin et al [70] modificaron las metaheurísticas planteadas por [68] considerando que algunas variables de decisión y restricciones son redundantes lo que permitió encontrar soluciones cercanas al óptimo e incrementar la

eficiencia computacional en la obtención de resultados. Una revisión de los modelos de transporte de carga multimodal y multimodal desarrollados desde el año 2005 ha sido compilado por [13].

2.6 El problema de localización de terminales logísticas multimodales en entornos competitivos

Considerando los trabajos expuestos anteriormente, se puede notar que la mayoría de los problemas de localización de *hubs* en redes multimodales hacen referencia al diseño de redes de una firma en particular, sin embargo, el estudio de redes en donde varias firmas compiten por prestar el servicio a los clientes ha recibido mucha atención por parte de los investigadores. En entornos competitivos, la finalidad es maximizar la cuota de mercado de una firma/instalación con respecto a su competencia. Marianov et al. [81] fueron los primeros en desarrollar un modelo de ubicación de *hub* los cuales son ubicados con el fin de maximizar la captura de flujo entre los operadores que compiten en el mercado. Para resolver el modelo plantean una heurística y diferentes escenarios de atracción de flujo dependiendo de la relación de costos entre la firma y el resto de los competidores. Posteriormente, en el año 2008, este modelo fue modificado por Wagner [82] con el fin de proporcionar soluciones óptimas mucho más rápidas.

Marianov et al. [83] presentaron un modelo y una heurística para encontrar la mejor instalación para una empresa que desea entrar al mercado donde existe una empresa competidora operando en la misma zona geográfica. El modelo busca determinar la ubicación de tal manera que se maximice la captura de mercado modelada como las elecciones de los usuarios (clientes) las cuales están basadas en los tiempos de viaje y de espera. En este modelo, la atracción de cada alternativa está representada por la función de costos percibidos por el usuario. La probabilidad P_{ij} de un usuario de la instalación en el nodo i escoger ir a la instalación en el nodo j está dado por el siguiente modelo logit multinomial, MNL, [84]:

$$P_{ij} = \frac{Y_j e^{-\theta C_{ij}}}{\sum_{k \in N} Y_k e^{-\theta C_{ik}} + \sum_{k \in N'} e^{-\theta C_{ik}}} \quad (6)$$

En la anterior expresión, Y_i es una variable binaria de localización, θ es el factor de escala asociado con la varianza del término de error y C_{ij} es el costo, percibido por el cliente en el nodo i , de cambiarse a una instalación situada en el nodo j . N y N' son, respectivamente, los conjuntos de ubicaciones candidatas para la empresa que ingresa y los conjuntos de ubicaciones ocupadas por las empresas ya instaladas.

Por su parte, en el año 2009, Eiselt & Marianov [85] desarrollaron un modelo probabilístico para resolver este tipo de problemas incorporando funciones de utilidad que siguen otros modelos de elección como el modelo de gravedad desarrollado por [86] con el fin de maximizar la cuota de mercado de los nuevos *hubs*. El modelo propuesto es el que expresa a continuación en donde h_{ij} es la demanda entre los nodos i y j , y_k es una variable binaria que asume el valor de 1 si un *hub* es ubicado en el nodo k , w_{kl} es una variable binaria que es igual a 1 si los nodos k y l son escogidos como *hub* y p_{ijklo} es la proporción capturada por una ruta y la firma o .

$$Max Z = \sum_{ij} \sum_{k,l \in O_{wn}} h_{ij} p_{ijklo} \quad (7)$$

$$Max Z = \sum_{ij} h_{ij} \frac{\sum_{k,l \in O_{wn}} w_{kl} u_{ijklo}}{\sum_{m,n \in O_{wn}} w_{mn} u_{ijmno} + \sum_{s \neq 0} \sum_{m,n \in C_{omp}} u_{ijmns}} \quad (8)$$

Sujeto a

$$w_{kl} \leq y_k, \forall k, l \in O_{wn} \quad (9)$$

$$w_{kl} \leq y_l, \forall k, l \in O_{wn} \quad (10)$$

$$\sum_k y_k = p \quad (11)$$

$$y_k, w_{kl} \in \{0,1\}, \quad \forall k, l \quad (12)$$

En los modelos descritos anteriormente, se asume que la atracción de cada firma depende del comportamiento de los clientes los cuales toman su decisión basados en la utilidad percibida de manera independiente. Esta utilidad, por lo general, depende de tres factores: la atracción hacia cada firma (comodidad, seguridad, servicio, comida, entre otros), precio y tiempo de viaje. Por lo anterior, este tipo de modelos permiten incluir diferentes factores para determinar la elección de los usuarios lo cual deja a un lado el supuesto que la firma ganadora

se lleva todo. En otras palabras, relajan la asignación tipo “*todo o nada*”, en la cual la alternativa de mínimo costo será la elegida. En vez de ello, se plantea una asignación estocástica, que asigna probabilidades de elección a todas las alternativas. En cualquier caso, el modelo es suficientemente general. Si el parámetro de escala θ tiende a infinito (muy grande), la asignación será del tipo “*todo o nada*”; entretanto, si tiende a cero (muy pequeña), será un modelo equiprobable.

Posteriormente, otros estudios de localización de instalaciones en ambientes competitivos fueron desarrollados. Gelareh et al. [50] planteó el diseño de redes de transporte marítimo tipo *hub – spoke* en entornos de competencia. Ellos plantearon un modelo de programación entera mixta con el fin maximizar la capacidad de atracción de clientes en términos de tiempos de viaje y costos de transporte entre un proveedor de servicio nuevo y un operador existente para lo que determinaron una función de atracción por etapas. Aros-Vera et al. [87] proponen un modelo para la ubicación de parqueaderos, los cuales son modelados como instalaciones tipo *hub*, donde los usuarios cambian de modo y llegan a su destino final utilizando el transporte público. Para determinar la atracción de demanda que tendría cada facilidad utilizan un modelo MNL dado que existen diferentes alternativas de instalaciones y modos. Lüer-Villagra & Marianov [88] presentaron un modelo para resolver el problema de ubicación de instalaciones y fijación de precios cuyo objetivo es maximizar los beneficios de la compañía considerando aspectos como la decisión de precios óptimos y la elección discreta de los clientes. En el modelo, asumieron que hay reducción de los costos debido a las economías de escala generadas por el flujo en cada *hub* y los factores de descuento son iguales y el comportamiento de los clientes fue modelado mediante un modelo MNL. Por su parte, Fotuhi & Huynh [89] determinaron la mejor ubicación de terminales logísticas multimodales considerando competencias entre las terminales existentes y las nuevas terminales, capacidad de las terminales e incertidumbre en la demanda. Para esto desarrollaron un algoritmo de recocido simulado que permitió resolver modelos de programación no lineal entera mixta y concluyeron que factores como la ubicación y la capacidad son más robustos al considerar diferentes escenarios de demanda de transporte de mercancías.

En la siguiente sección se discute la formulación y desarrollo de un modelo matemático de programación no lineal entera para el transporte de mercancía en redes multimodales que se extiende al modelo del p - *hub* median considerando ambientes competitivos.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La caracterización, descripción y formulación matemática del modelo de ubicación de terminales logísticas tipo *hub* en ambiente competitivo que se discute en esta sección se enmarca en el contexto de una red logística de carga con transporte multimodal (carretera - río - tren), sin embargo, este modelo es aplicable a otras diferentes configuraciones de redes de transporte.

3.1 Caracterización del modelo

En el presente trabajo, la red de transporte se define como un grafo $G(N, A)$ en donde el conjunto de nodos N representa los nodos de generación y atracción de carga y el conjunto de arcos A representa los diferentes modos de transporte entre los nodos. Este conjunto de arcos está conformado por tres subconjuntos: A_1 , A_2 y A_3 los cuales representan los tres modos de transporte en estudio: carretero, fluvial y férreo respectivamente y hacen referencia a la red multimodal de transporte de conexión entre nodos.

Un envío entre cada origen i y destino j puede ser transportado de cuatro maneras: (1) a través de envíos directos utilizando la red unimodal carretera, (2) usando una red de transporte multimodal a través de un único *hub* k , por lo que no se realizarían viajes entre terminales *hub* (3) usando una red de transporte multimodal a través de un único *hub* m y (4) a través de un par de terminales *hub* (k, m) en una red multimodal como se observa en la Figura 3. Esta última opción implica el transporte desde el origen i a la terminal k en camión. Luego el transporte *inter-hub* entre la terminal k y la terminal m que puede realizarse usando diferentes modos de transporte y, finalmente, el transporte de la terminal m hacia el destino j que también puede realizarse por las diferentes alternativas de transporte. En este sentido, cada terminal tipo *hub* es un centro de carga en el que se lleva a cabo la consolidación de mercancía que es recogida en cada origen y, posteriormente, son despachados de acuerdo al destino. El transporte entre terminales *hub* implica mayor movimiento de mercancías y recorridos de grandes distancias. En el análisis de la red de transporte, se asumió que los cambios de modos tienen un costo asociado al trasbordo de la carga en los nodos tipo *hub*.

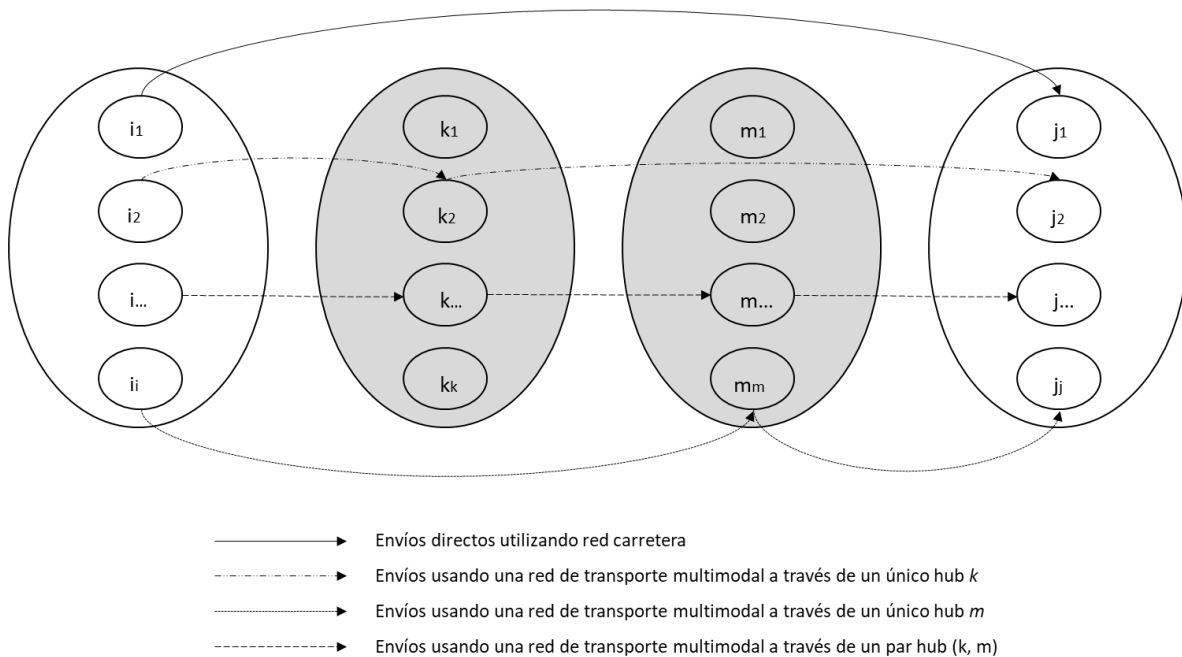


Figura 3. Tipos de envío en una red hub – spoke
Fuente: Elaboración propia

3.2 Supuestos del modelo

En el modelo matemático se contemplaron los siguientes supuestos:

- Se asume que los tomadores de decisión tienen pleno conocimiento de la red de transporte. En este sentido, el individuo puede decidir sobre la preferencia de las alternativas disponibles, envío directo o haciendo uso de al menos una terminal logística, para maximizar el valor de la función de utilidad.
- La utilidad derivada de una elección es función de las variables explicativas de dicha decisión, que son las características propias de cada una de las alternativas de elección y las características personales propias del individuo, en este caso, el costo y el tiempo.
- El Modelo Logit, siguiendo la teoría de utilidad aleatoria, asume que la utilidad de una alternativa de envío para un individuo contempla un componente de error. Este carácter aleatorio de la función de utilidad se distribuye independiente e idénticamente según una función Gumbel.
- No hay correlación entre las alternativas de elección de las rutas disponibles.
- No hay restricciones de capacidad en cada una de las terminales logísticas.

3.3 Definición del modelo

El problema de localización de terminales logísticas multimodales planteado considera un conjunto $i \in I$ de nodos origen (generadores de carga), un conjunto $j \in J$ de nodos destino (atractores de carga), un conjunto $k \in K$ de potenciales localizaciones de terminales logísticas de consolidación de carga, un conjunto $m \in M$ de potenciales localizaciones de terminales logísticas de distribución de carga, un conjunto $p \in P$ que hace referencia a los tipos carga, un conjunto $r \in R$ de las posibles rutas disponibles para enviar carga de un nodo i a un nodo j y un conjunto $t \in T$ conformado por los diferentes modos de transporte empleados para el movimiento de mercancías.

Este modelo está descrito por parámetros de costos fijos de instalación, costos de conectividad modal (trasbordo) y costos de transporte de acuerdo con el tipo de producto. El parámetro q representa el número de terminales logísticas $k \in K$ y $m \in M$ que serán abiertas. Para cada terminal $k \in K$ existe un costo fijo de instalación del *hub* I_k y para cada terminal $m \in M$ se tiene un costo fijo de instalación I_m . Estos costos están asociados a los costos de arrendamiento, amortización del costo de capital, mano de obra y equipos [4].

El parámetro C_{ij}^p está relacionado con el costo unitario de transporte para el caso de envío directo entre pares origen - destino (i, j) por tipo de carga p mientras que los parámetros C_{ikj}^p , C_{imj}^p , C_{ikmj}^p hacen referencia a los costos unitarios de transporte utilizando la red multimodal para envío realizados utilizando solo el *hub* k , solo el *hub* m y envíos utilizando el *par hub* (k, m) por tipo de producto p , respectivamente. En este modelo, el costo unitario de transporte se asume como el costo compuesto generalizado [90] que calcula la utilidad conjunta teniendo en cuenta que para el envío de carga entre nodos existe al menos una ruta de distribución de mercancías r utilizando diferentes modos de transporte t .

Para el caso del envío directo C_{ij}^p , el costo generalizado está relacionado con el costo C_{ijr}^p que significa el costo de enviar un producto p entre el origen i y el destino j por la ruta r . Para el caso de envío a través de la terminal logística k , el costo generalizado C_{ikj}^p hace referencia al costo C_{ikr}^p y C_{kjr}^p que corresponde al costo de enviar un producto p entre el origen i y la terminal k por la ruta r y al costo de enviar un producto p entre la terminal k y el destino j por la ruta r , respectivamente. Para la alternativa de envío a través de la terminal logística m , el costo

generalizado C_{imj}^p hace referencia al costo C_{imr}^p y C_{mjr}^p que corresponde al costo de enviar un producto p entre el origen i y la terminal m por la ruta r y al costo de enviar un producto p entre la terminal m y el destino j por la ruta r , respectivamente. Por último, el costo generalizado C_{ikmj}^p , considera los costos C_{ikr}^p , C_{kmr}^p y C_{mjr}^p que corresponde al costo de enviar un producto p entre el origen i y la terminal k por la ruta r , el costo de enviar un producto p entre las terminales k y m por la ruta r y el costo de enviar un producto p entre la terminal m y el destino j por la ruta r , respectivamente.

Adicionalmente, el costo generalizado incluye parámetros asociados al costo de conectividad modal, T_t^p , y al costo del tiempo entendido como el tiempo de viaje, t_v , y el tiempo de trasbordo entre los modos de transporte disponibles, t_t , para cada terminal logística. Para cada una de las alternativas de envío consideradas en la caracterización del modelo, el costo generalizado se encuentra definido de la siguiente manera:

$$C_{ij}^p = \frac{1}{\theta_c^p} \ln \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} e^{-\theta_c^p \left(C_{ijr}^p + \left(\frac{\theta_t^p}{\theta_c^p} \right) * t_v \right)}, \forall i \in I, j \in J, p \in P, r \in R, t \in T \quad (13a)$$

$$C_{ikj}^p = \frac{1}{\theta_c^p} \ln \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} e^{-\theta_c^p \left((C_{ikr}^p + \delta C_{kjr}^p + T_t^p) + \left(\frac{\theta_t^p}{\theta_c^p} \right) * (t_v + t_t) \right)}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, r \in R, t \in T \quad (13b)$$

$$C_{imj}^p = \frac{1}{\theta_c^p} \ln \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} e^{-\theta_c^p \left((C_{imr}^p + \delta C_{mjr}^p + T_t^p) + \left(\frac{\theta_t^p}{\theta_c^p} \right) * (t_v + t_t) \right)}, \forall i \in I, j \in J, m \in M, p \in P, r \in R, t \in T \quad (13c)$$

$$C_{ikmj}^p = \frac{1}{\theta_c^p} \ln \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} e^{-\theta_c^p \left((C_{ikr}^p + (\varphi C_{kmr}^p + T_t^p) + (\varphi C_{mjr}^p + T_t^p)) + \left(\frac{\theta_t^p}{\theta_c^p} \right) * (t_v + t_t) \right)}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M, p \in P, r \in R, t \in T \quad (13d)$$

En las ecuaciones anteriores, los parámetros θ_c^p y θ_t^p permiten calibrar el modelo de elección estocástico para las diferentes categorías de producto. Además, θ_c^p corresponde al parámetro “*teta del costo*” de la función de utilidad del modelo de elección estocástico. Además, cada uno de los costos C_{ikj}^p y C_{imj}^p , tiene un factor de descuento δ mientras que el costo C_{ikmj}^p un factor de descuento φ , que hace referencia a las economías de escala generadas por la consolidación de carga transportada en cada tipo de envío.

Existen variables de elección P_{ij}^p , P_{ikj}^p , P_{imj}^p y P_{ikmj}^p que representan la proporción de flujo de producto W_{ij}^p por tipo de producto p que se transportar por cada tipo de envío de acuerdo a la oferta de la ciudad de origen i y demanda del puerto de destino j y que dependen de la decisión de abrir o no una facilidad.

El parámetro T^p representa los costos unitarios de conectividad modal en las terminales k y m entre los modos de transporte t . Estos costos están asociados al tamaño del envío por tipo de carga y a las necesidades de operación de cada modo de transporte.

Las variables de decisión que se plantean en el modelo matemático son binarias donde Y_k , toma el valor de 1 si la facilidad k es seleccionada como centro consolidador de carga y 0 en otro caso. Así mismo, Y_m , toma el valor de 1 si la facilidad m es escogida como centro de distribución de mercancías y 0 en otro caso. Adicionalmente, Y_{km} , será 1 si $Y_k * Y_m = 1$, es decir, si ambas instalaciones son seleccionadas; 0 en otro caso.

El objetivo del modelo es minimizar el costo total (transporte y externalidades) en una red logística multimodal determinando cuantas terminales deben ser abiertas y asignándole los flujos de carga que se movilizarán a través de ellas. No obstante, se debe considerar que los individuos eligen según el costo generalizado percibido.

3.4 Modelo matemático de ubicación de instalaciones en ambientes competitivos

La formulación matemática del modelo presentado para el problema de ubicación de terminales logísticas bajo el enfoque p-hub en ambientes competitivos considerando el modelo logit multinomial (MNL) como modelo de elección estocástica es como sigue:

Conjuntos:

I	Conjunto de nodos generadores de carga
J	Conjunto de nodos atractores de carga
K	Conjunto de potenciales terminales de consolidación (<i>hub</i>)
M	Conjunto de potenciales terminales de distribución (<i>hub</i>)
P	Conjunto de tipos de producto
R	Conjunto de rutas disponibles para realizar envíos de carga

T	Conjunto de modos de transporte
-----	---------------------------------

Parámetros:

q	Número de terminales abiertas
I_k	Costo fijo de instalación de una terminal de consolidación en una terminal $k \in K$
I_m	Costo fijo de instalación de una terminal de distribución en una terminal $m \in M$
Cap_k	Capacidad de la terminal de consolidación $k \in K$
Cap_m	Capacidad de la terminal de consolidación $m \in M$
T_t^p	Costo de trasbordo unitario del modo $t \in T$ por tipo categoría de producto $p \in P$
C_{ij}^p	Costo de transporte unitario del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando la alternativa de envío directo por categoría de producto $p \in P$
C_{ikj}^p	Costo de transporte unitario del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando la alternativa de envío a través de la terminal $k \in K$ por categoría de producto $p \in P$
C_{imj}^p	Costo de transporte unitario del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando la alternativa de envío a través de la terminal $m \in M$ por categoría de producto $p \in P$
C_{ijkm}^p	Costo de transporte unitario del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando la alternativa de envío a través del par de terminales $k \in K$ y $m \in M$ por categoría de producto $p \in P$
E_{ij}^p	Costo de externalidades por envío del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando envío directo por categoría de producto $p \in P$
E_{ikj}^p	Costos de externalidades por envío del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando la terminal $k \in K$ por categoría de producto $p \in P$
E_{imj}^p	Costos de externalidades por envío del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando la terminal $m \in M$ por categoría de producto $p \in P$
E_{ijkm}^p	Costos de externalidades por envío del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ utilizando el par de terminales $k \in K$ y $m \in M$ por categoría de producto $p \in P$
W_{ij}^p	Demanda de carga a enviar del nodo de origen $i \in I$ al destino $j \in J$ por categoría de producto $p \in P$

Variables de Elección

P_{ij}^p	Proporción de flujo de mercancía del producto $p \in P$ que se envía directamente del origen $i \in I$ al destino $j \in J$.
P_{ikj}^p	Proporción de flujo de mercancía del producto $p \in P$ que se envía del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ a través de la terminal $k \in K$.
P_{imj}^p	Proporción de flujo de mercancía del producto $p \in P$ que se envía del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ a través de la terminal $m \in M$.
P_{ijkml}^p	Proporción de flujo de mercancía del producto $p \in P$ que se envía del origen $i \in I$ al destino $j \in J$ a través de las terminales $k \in K$ y $m \in M$.

Variables de decisión

Y_k	1 si una terminal k es escogida como hub de consolidación, 0 en otro caso
Y_m	1 si una terminal m es escogida como hub de distribución, 0 en otro caso
Y_{km}	1 si $Y_k * Y_m = 1$, 0 en otro caso

Función Objetivo

$$\begin{aligned}
 \text{Min } & \sum_{k \in K} I_k Y_k + \sum_{m \in M} I_m Y_m + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} P_{ij}^p W_{ij}^p (C_{ij}^p + E_{ij}^p) \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} P_{ikj}^p W_{ij}^p (C_{ikj}^p + E_{ikj}^p) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} P_{imj}^p W_{ij}^p (C_{imj}^p + E_{imj}^p) \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} P_{ijkml}^p W_{ij}^p (C_{ijkml}^p + E_{ijkml}^p) \quad (14)
 \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} Y_k + \sum_{m \in M} Y_m = q \quad (15)$$

$$\sum_{p \in P} P_{ij}^p + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} P_{ikj}^p + \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} P_{imj}^p + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} P_{ijkml}^p = 1, \forall i \in I, j \in J \quad (16)$$

$$P_{ij}^p = \frac{e^{-\theta_c^p C_{ij}^p}}{e^{-\theta_c^p C_{ij}^p} + \sum_{k \in K} Y_k e^{-\theta_c^p C_{ikj}^p} + \sum_{m \in M} Y_m e^{-\theta_c^p C_{imj}^p} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} Y_{km} e^{-\theta_c^p C_{ijkml}^p}}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M, p \in P \quad (17a)$$

$$P_{ikj}^p = \frac{Y_k e^{-\theta_c^p c_{ikj}^p}}{e^{-\theta_c^p c_{ij}^p} + \sum_{k \in K} Y_k e^{-\theta_c^p c_{ikj}^p} + \sum_{m \in M} Y_m e^{-\theta_c^p c_{imj}^p} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} Y_{km} e^{-\theta_c^p c_{ikmj}^p}}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M, p \in P \quad (17b)$$

$$P_{imj}^p = \frac{Y_m e^{-\theta_c^p c_{imj}^p}}{e^{-\theta_c^p c_{ij}^p} + \sum_{k \in K} Y_k e^{-\theta_c^p c_{ikj}^p} + \sum_{m \in M} Y_m e^{-\theta_c^p c_{imj}^p} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} Y_{km} e^{-\theta_c^p c_{ikmj}^p}}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M, p \in P \quad (17c)$$

$$P_{ikmj}^p = \frac{Y_k Y_m e^{-\theta_c^p c_{ikmj}^p}}{e^{-\theta_c^p c_{ij}^p} + \sum_{k \in K} Y_k e^{-\theta_c^p c_{ikj}^p} + \sum_{m \in M} Y_m e^{-\theta_c^p c_{imj}^p} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} Y_{km} e^{-\theta_c^p c_{ikmj}^p}}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M, p \in P \quad (17d)$$

$$Y_k + Y_m \leq 1 + Y_{km}, k \in K, m \in M \quad (18)$$

$$2Y_{km} \leq Y_k + Y_m, k \in K, m \in M \quad (19)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} P_{ikj}^p W_{ij}^p + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} P_{ikmj}^p W_{ij}^p \leq Cap_k Y_k, \forall k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} P_{imj}^p W_{ij}^p + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} P_{ikmj}^p W_{ij}^p \leq Cap_m Y_m, \forall m \in M \quad (21)$$

$$Y_k, Y_m, Y_{km} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, m \in M \quad (22)$$

La función objetivo (14) minimiza el costo total de la red de transporte multimodal para el envío de mercancías. El primer término de la función es el costo fijo de instalación de terminales a nivel de consolidación de carga mientras que el segundo término representa el costo fijo de instalación de terminales de distribución. El tercer término es el costo de transporte de los envíos directos del origen i al destino j . El cuarto, quinto y sexto término hacen referencia al costo de transporte de los envíos que se realizan a través de las terminales el cual incluye el costo de recogida de la carga, el costo de transbordo en cada una de las terminales y el costo de entrega en el destino final.

La restricción (15) asegura que q terminales serán seleccionadas. La restricción (16) garantiza que el flujo de carga entre los nodos i y j es ruteado a través del envío directo o a través de las terminales que se encuentren disponibles. Las restricciones (17a), (17b), (17c) y (17d) hacen referencia a la proporción de flujos asignados a cada terminal según el modelo MNL considerando los costos de generalizados de transporte para envíos directos o para rutas a través de terminales respectivamente. Puede notarse que las funciones de utilidad dependen de los costos percibidos. Las restricciones (18) y (19) garantizan la resolución del problema de multiplicación de las variables binarias. Las restricciones (20) y (21) garantizan que el

flujo de carga que maneja cada terminal es menor o igual a la capacidad instalada en cada terminal. Finalmente, la restricción (22) es una restricción de no negatividad.

En caso que se quiera incluir variaciones en los gustos, matrices de covarianza arbitraria o definir funciones de utilidad flexibles se recomienda calcular las proporciones de flujo de mercancía de cada facilidad a través de modelos Logit Mixto (ML) también conocido como logit de componentes de error. Para este tipo de modelos se sugiere evaluar las condiciones de identificabilidad de los parámetros del modelo [91] y posteriormente estimarlos mediante la técnica de máxima verosimilitud simulada. En dicho caso la probabilidad de elección está dada por la expresión (28) donde $f(\theta/\tau)$ hace referencia a la función densidad según la cual varían los gustos donde τ representa. los parámetros de la distribución

$$P_{ij}(\tau) = \int \frac{e^{-\theta_c^p c_{ij}^p}}{e^{-\theta_c^p c_{ij}^p} + \sum_{k \in K} Y_k e^{-\theta_c^p c_{ikj}^p} + \sum_{m \in M} Y_m e^{-\theta_c^p c_{imj}^p} + Y_k Y_m e^{-\theta_c^p c_{ikmj}^p}} f(\theta/\tau) d\theta \quad (28)$$

4. CASO DE APLICACIÓN

Un caso de estudio fue realizado para analizar la aplicabilidad del modelo a una red de transporte logística multimodal en que se incluya la instalación de terminales logísticas como centros de consolidación y distribución de carga.

4.1 Situación logística en Colombia

Desde hace una década, el Gobierno de Colombia se ha trazado un compromiso para mejorar la competitividad y productividad del país. En este sentido, se ha desarrollado una “Política Nacional Logística - PNL”, a través del Conpes 3547, que contribuya al desarrollo del sistema logístico del país que permita hacer frente a los desafíos que este impone. La PNL planteó seis ejes estratégicos: Institucionalidad, Producción de Información, Provisión de infraestructura, Facilitación del Comercio Exterior, Tecnologías de Información y Comunicaciones y Servicios Logísticos y de Transporte que han venido siendo implementados con apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [92]. Con relación al primer eje se emprendieron acciones para fortalecer el marco institucional alrededor de la logística, de manera que se avanzaran acciones coordinadas entre diferentes entidades públicas y privadas. Se ha permitido consolidar grupos de apoyo técnico especializados en logística al interior del Departamento Nacional de Planeación (Unidades Técnicas de Ejecución Logística) y el Ministerio de Transporte (Grupo de Logística y Carga). Con respecto al segundo eje, dado que en la PNL se identificó la segmentación, dispersión y ausencia de información específica en logística como una de las principales problemáticas del sector se desarrolló la Encuesta Nacional Logística (ENL), se estructuró el Observatorio Nacional de Logística y el Sistema de Indicadores Logísticos en Centros Urbanos como herramientas estratégicas para capturar, analizar y difundir la información logística a nivel del país y del manejo de carga en los principales centros urbanos del país respectivamente. Además, se estructuró el Sistema de Información Logística Georreferenciada como herramienta geográfica para visualizar la información específica en logística que sea ingresada en su fuente de datos. En lo que concierne a información del transporte de carga por carretera se desarrolló el Registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC) como la principal herramienta informática del Ministerio de Transporte para recolectar información del transporte de carga por carretera en tiempo real. Por otra parte, se adelantó el diseño

preliminar y la construcción de un prototipo Integrador de Sistemas de Entrenamiento (INSIDE) como herramienta que permitirá consolidar información sobre los procesos logísticos en puertos del transporte de carga por carretera. En atención al tercer eje, se realizó el análisis de factibilidad de una plataforma logística ubicada en la zona del Magdalena Medio orientada a la carga agrícola. En esta región, Barrancabermeja es el lugar con el mayor potencial logístico para una plataforma multimodal. Sin embargo, esta plataforma ya había sido diseñada y evaluada previamente a nivel de factibilidad, por iniciativa de la alcaldía de Barrancabermeja y Ecopetrol. Por esta razón, el estudio se enfocó en el diseño y evaluación de un agrocentro en otra zona del Magdalena Medio. La localización recomendada por el estudio para el agrocentro es la sección norte del Magdalena Medio, cerca al municipio de Aguachica. Aunque esta plataforma no está incluida en el sistema nacional propuesto por la PNL, contribuiría a mejorar los procesos logísticos de los productos agrícolas de la región. También se apoyó la estructuración general del esquema Entes Gestores para el Desarrollo Económico y Social como mecanismo de promoción de plataformas logísticas. Considerando provisión de infraestructura en los modos de transporte férreo y fluvial, el BID apoyó recientemente la formulación del Plan Maestro Fluvial, a través de la financiación de un estudio que estructuró los componentes operacional y promocional del plan. Haciendo referencia al cuarto eje, se ha registrado avances como el nuevo estatuto aduanero y la creación de la figura del Operador Económico Autorizado. En cuanto a tecnologías de información y comunicaciones como quinto eje estratégico, se logró la expedición del Decreto 2846 que dio el primer paso en la creación de un sistema Recaudo Electrónico Vehicular interoperable a nivel nacional. Este sistema facilitará las operaciones de pago de peajes por parte de vehículos de carga, disminuyendo sus tiempos de recorrido en carreteras. Adicionalmente, el estándar tecnológico definido facilitará las actividades de seguimiento y posicionamiento de vehículos de carga por parte de empresas de transporte o empresas productivas que realizan directamente sus procesos de transporte de carga. Por último, en el eje estratégico de Servicios Logísticos y de Transporte, se creó el Índice de Costos del Transporte de Carga por carretera recomendado por el documento CONPES 3489 de 2007 - Política Nacional de Transporte Público Automotor de Carga- como insumo necesario para monitorear los precios de mercado del sector e identificar posibles fallas de mercado en un ambiente de desregulación tarifaria. Adicionalmente, la publicación periódica de este índice

permite monitorear en el tiempo el comportamiento de los costos del transporte de carga por carretera, parte esencial de los costos logísticos del país, y, por lo tanto, evaluar la efectividad de las políticas que se implementen. Otro aporte en este eje fue la revisión, actualización y aplicación del modelo de oferta vehicular del Ministerio de Transporte con el que se calcularon los Indicadores de oferta y demanda del parque automotor de transporte de carga a nivel nacional actualizado a 2013. Se realizó el diseño metodológico para la evaluación de la Política Nacional de Transporte Público Automotor de Carga. También se desarrolló el Sistema de Información para la Regulación del Transporte de Carga por Carretera (SIRTCC). Este sistema le permite al Ministerio de Transporte monitorear con precisión e inmediatez el comportamiento de los precios de mercado del transporte de carga por carretera [92].

Pese a las inversiones realizadas y adelantos logísticos señalados anteriormente, según el Reporte de Competitividad Global 2015-2016 [93], Colombia obtuvo una calificación de 4.28 ocupando el puesto 61 entre 140 economías evaluadas. Este índice está basado en 12 pilares que permiten visualizar el panorama de la competitividad internacional para países en cualquier etapa de desarrollo; ellos son instituciones, infraestructura, macroeconomía, salud, educación primaria y educación superior, eficiencia de los bienes del mercado, eficiencia de la labor de mercado, desarrollo del mercado financiero, tecnología, tamaño del mercado, negocios e innovación. Además, en el año 2016, Colombia ocupó el puesto 94 entre 160 países recuperando 3 posiciones con respecto al puesto obtenido en el año 2014 en el Índice de Desempeño Logístico (IDL) realizado por el Banco Mundial [94] realiza cada dos años como herramienta de evaluación comparativa entre países con el propósito de medir el desempeño de la cadena de abastecimiento de un país y, de esta manera, identificar los retos y oportunidades que enfrentan en su desempeño logístico para mejorar en cada uno de los factores evaluados. El IDL evalúa teniendo en cuenta los siguientes componentes: aduana, infraestructura, envíos internacionales, calidad y competencias logísticas, rastreo y trazabilidad y puntualidad.

Teniendo en cuenta esta situación, se decidió aplicar el modelo de localización de terminales logísticas desarrollado en esta investigación a la red logística colombiana con el propósito de identificar posibles instalaciones de centros logísticos y nodos de transferencia de carga en los corredores logísticos identificados por estudios anteriores.

4.2 Red logística de transporte multimodal

Para el caso de estudio se consideró una red de transporte multimodal conformada por veintiocho (28) nodos generadores de carga que corresponden a los departamentos que realizan operaciones de comercio exterior y tres (3) nodos atractores de carga que son asignados a los principales puertos marítimos de la costa Atlántica por los cuales ingresa y/o sale la mercancía del país. Como alternativas para la ubicación de las terminales de consolidación de carga, se contemplaron tres (3) posibles alternativas que corresponden a sitios de alta concentración de carga en el interior del país y que tienen conexión con el río Magdalena y/o la red férrea del Atlántico con el fin de incentivar el transporte multimodal en el país. De igual forma, se asumieron tres (3) alternativas para los centros de distribución pensados como sitios que permitan la descongestión de los puertos, rápida distribución y que también cuenten con conexión a las redes mencionadas anteriormente. En general, la elección de estas terminales tanto de consolidación como de distribución fue determinada luego de identificar aquellos puntos que permitan descentralizar los productos en dirección del interior del país o hacia los puertos de exportación o, al contrario, recibir importantes flujos del interior del país o el resto del mundo para optimizar la distribución final de la mercancía y reducir los costos de transporte gracias a una mejor gestión de los recursos. En la Tabla 2 se presentan los detalles acerca de la codificación de los nodos generadores y atractores de carga, así como las terminales de consolidación y de distribución usadas en el caso de estudio.

La Figura 4 muestra la ubicación de los nodos generadores y atractores de carga y las terminales logísticas candidatas en el mapa de Colombia. A su vez, la Figura 5 muestra la red logística multimodal utilizada en el estudio la cual contiene las redes de los diferentes modos de transporte utilizados. Ellos son: la red vial primaria y secundaria, la red fluvial del río Magdalena incluyendo el tramo del Canal del Dique y la bifurcación del Brazo de Loba; y el corredor férreo que facilita la comunicación desde La Dorada (Caldas) hasta el Puerto de Santa Marta.

Otros aspectos considerados en este trabajo son las siguientes:

- Se consideró solo el tipo de carga general. La carga fue asumida como el total de carga de comercio exterior entre cada par origen – destino.

- El tiempo de transbordo asumido en cada terminal fue de 2 horas.

Tabla 2. Codificación de los nodos de generación y atracción de carga y de las terminales logísticas propuestas.

Código	Nodos Generadores	Código	Nodos Generadores
0	Putumayo	22	Santander
1	Caquetá	23	Boyacá
2	Huila	24	Santa Fe de Bogotá D.C.
3	Tolima	25	Cauca
4	Quindío	26	Valle del cauca
5	Risaralda	27	Nariño
6	Chocó	28	Cundinamarca
7	Caldas		
8	Antioquia	Código	Nodos Atractores
9	Córdoba	P1	Barranquilla
10	Sucre	P2	Santa Marta
11	Bolívar	P3	Cartagena
12	Atlántico		
13	Guaviare	Código	Terminales de Consolidación
14	Vichada	CC1	Puerto Berrío
15	Meta	CC2	Barrancabermeja
16	Casanare	CC3	La Dorada
17	Arauca		
18	La Guajira	Código	Terminales de Distribución
19	Magdalena	CD1	Gamarra
20	Cesar	CD2	Magangué
21	Norte de Santander	CD3	Ponedera

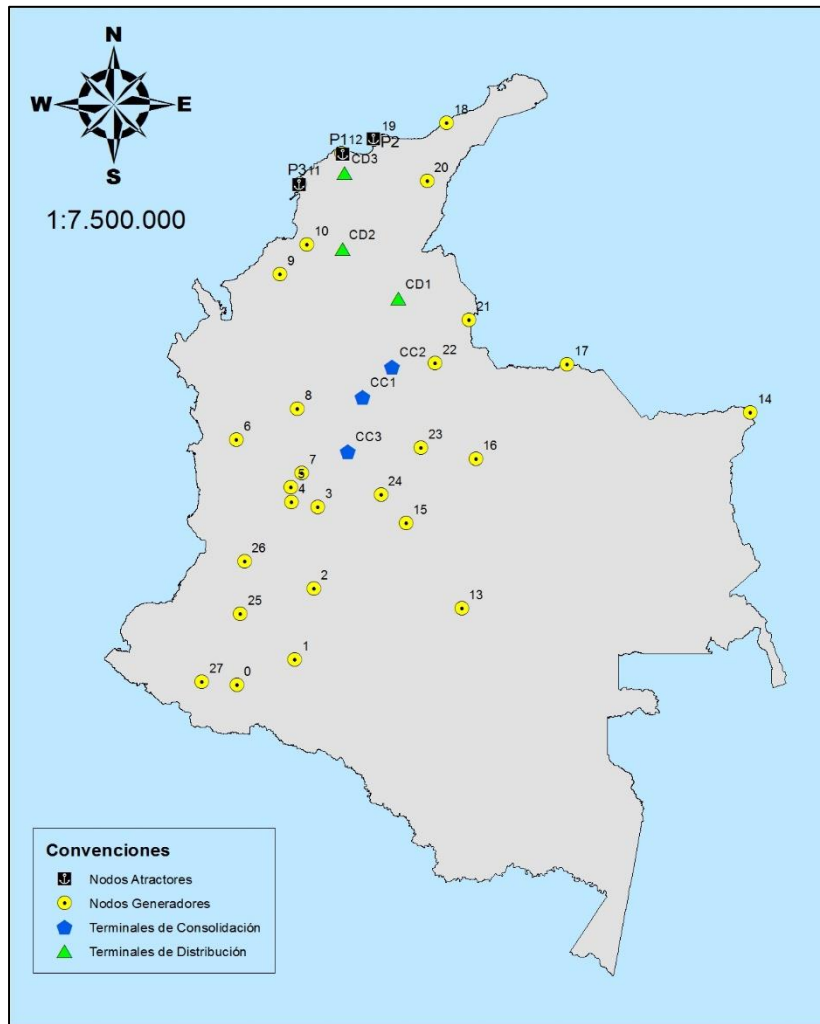


Figura 4. Ubicación de los nodos de generación y atracción de carga y de las terminales logísticas propuestas.
Fuente: Elaboración Propia

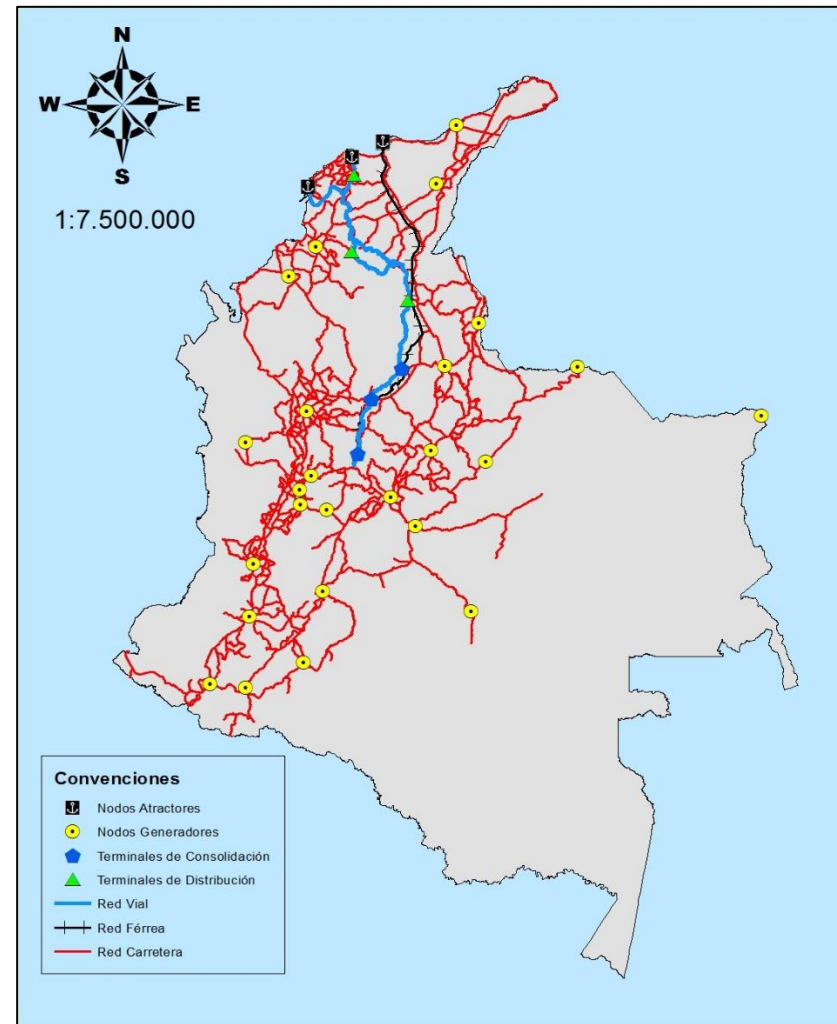


Figura 5. Red logística multimodal del estudio.
Fuente: Elaboración Propia

4.3 Parámetros de entrada

En el modelo de localización de terminales logísticas multimodales fueron considerados los siguientes datos de entrada:

4.3.1 Distancias y tiempos de viaje

La información sobre distancia y tiempos de viaje por carretera fueron calculados haciendo uso de la herramienta Google Maps ®, datos que fueron contrastados con el Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga – SICETAC – del Ministerio de Transporte Colombiano [95]. Para los casos en que se encontró más de dos rutas de transporte por par origen – destino se escogieron las dos alternativas con menor distancia y/o tiempo de viaje.

Por otro lado, la información relacionada distancia y tiempos de viaje por transporte fluvial fue tomada del *“Estudio de demanda del sistema fluvial del río Magdalena y evaluación del beneficio costo de un esquema de reactivación de la navegación fluvial”* elaborado por la compañía Steer Davies Gleave en el año 2013 [96]. En dicho estudio, el tiempo fue estimado asumiendo una velocidad de operación del río Magdalena de 5.0 km/h aguas abajo y 3.9 km/h aguas arriba. En este trabajo se consideró el aspecto que la velocidad promedio del río es de 5.0 km/h, además, se consideró que el puerto de Santa Marta no tiene acceso por vía fluvial.

En cuanto a la información asociada a distancia y tiempo de viaje por vía férrea fue tomada de estudios de optimización de redes de transporte férrea [97] y de encuestas aplicadas a empresas de transporte férreo. Para esta red, las alternativas de transporte disponibles fueron aquellas conexiones entre los puertos de Barrancabermeja, Puerto Berrío, La Dorada y Gamarra. En este trabajo se consideró el aspecto que los puertos de Barranquilla y Cartagena no tienen conexión ferroviaria.

Los costos de viaje por tonelada – kilómetro del transporte de carga terrestre fueron obtenidos del Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga – SICETAC [95]. Haciendo uso del simulador se asumió que la carga a transportar era carga general, el tiempo para la operación de cargue y descargue en los nodos i y j al igual que para las terminales logísticas k y m fue de 60 minutos cada una. Además, se consideró que la mercancía será transportada en camiones C6. Con relación al flete en transporte fluvial, se

tomó como referencia \$32 por tonelada – kilómetro en un convoy de 6 barcazas. Con respecto al flete en transporte ferroviario, se tomó como referencia un valor de mercado de \$37 por tonelada – kilómetro.

4.3.2 Costos fijos de instalación

Dada la dificultad de obtener datos acerca de los costos de instalación de los puertos tanto públicos como privados de Colombia, se tomó como referencia el valor de \$1.500.000.000/mes correspondiente al costo fijo de instalación de un proyecto de construcción de un puerto multimodal en la ciudad de Barrancabermeja. Este valor cubre los costos fijos de funcionamiento del puerto incluyendo infraestructura, muelle de atraque, área de almacenes, naves industriales, administración, estacionamiento y patio de maniobras.

4.3.3 Costos de transbordo

Adicionalmente se consideraron costos de transbordo modal por tonelada de la siguiente forma: \$8.000 por tonelada para los trasbordos entre los modos férreo y carretero, \$6000 por tonelada para las transferencias férrea-fluvial, mientras que para los trasbordos entre el modo carretero y el fluvial, el costo fue de \$3.000 por tonelada.

4.3.4 Costos Externos

Se consideraron los costos externos promedio de 0.014 US\$/ton-km para carreteras, 0.000105 US\$/ton-km para transporte fluvial y 0.0016 US\$/ton-km para ferrocarril [34].

4.3.5 Factor de descuento

El factor de descuento φ por uso de dos terminales logísticas es tomado como 0,9 [43], [74] mientras que el factor δ por uso de una terminal logística fue considerado como 0,95. En el estudio se realizó un análisis de sensibilidad con relación al factor de descuento con el fin de determinar el impacto que generan las economías de escala en el porcentaje de atracción de carga de cada una de las facilidades.

4.3.6 Flujos de carga

La información relacionada con los flujos de carga de las operaciones de exportación usados en este estudio se extrajo de la matriz origen – destino de carga de comercio exterior para Colombia elaborada en el proyecto Logport desarrollado por la Universidad del Norte, (Uninorte, 2015). Esta base de datos contiene los registros individuales de los movimientos

de carga de comercio exterior durante un año comprendido entre Agosto de 2013 – Julio de 2014. En la matriz creada se distingue información por período de envío, modo de transporte, puerto de comercio exterior, origen y destino de la carga, tipo de producto y peso del envío. Para este trabajo se consideraron los productos de exportación excepto del carbón, el petróleo y sus derivados. En la Figura 6 y Figura 7 se observa la carga exportada e importada por cada departamento considerado en el estudio y en la Tabla 3 se presenta la distribución de la carga a cada uno de los principales puertos marítimos de la costa caribe por los cuales se realizan las operaciones de comercio exterior. De lo anterior se puede decir que los departamentos que registran mayor movimiento de carga de comercio exterior por los puertos del Caribe Colombiano son Antioquia Atlántico, Bolívar y la ciudad de Bogotá. Estos altos volúmenes de carga se deben que estos departamentos son considerados los grandes centros industriales del país y a su cercanía a los puertos objeto de estudio.

Tabla 3. Carga movilizada por departamento según puerto marítimo de comercio exterior.

Carga				
Departamento	Puertos			Total
	Pto. Baq	Pto. Ctg	Pto. Smr	
Antioquia	603.774	2.207.451	948.903	3.760.128
Atlántico	3.430.692	218.325	29.551	3.678.568
Bogotá	1.189.396	1.768.760	496.159	3.454.316
Bolívar	25.753	2.822.265	9.755	2.857.774
Boyacá	295.081	539.782	429	835.291
Caldas	9.461	168.883	2.017	180.361
Cauca	0	167	2	169
Cesar	20.174	20.207	865	41.246
Córdoba	16.980	4.308	99.726	121.014
Cundinamarca	55.164	30.801	1.568	87.532
Chocó	412.002	871.578	378.475	1.662.055
Huila	0	3.690	26	3.716
La Guajira	20	37.342	12.678	50.040
Magdalena	1.907	38.024	22.723	62.654
Meta	61.133	165.547	753.617	980.297
Nariño	129	3.360	32	3.520
Norte de Santander	0	2.279	30	2.309
Quindío	196.730	40.959	4.407	242.095
Risaralda	28.116	21.270	1	49.388
Santander	2.831	72.154	507	75.493
Sucre	287.519	103.662	758.162	1.149.343
Tolima	912	95.652	1.212	97.777
Valle del Cauca	32.515	31.508	418	64.441
Arauca	137.585	326.625	31.384	495.595
Casanare	98	276	0	373
Caquetá	230	5.332	1.795	7.357
Putumayo	0	118	0	118
Guaviare	5	36	0	41

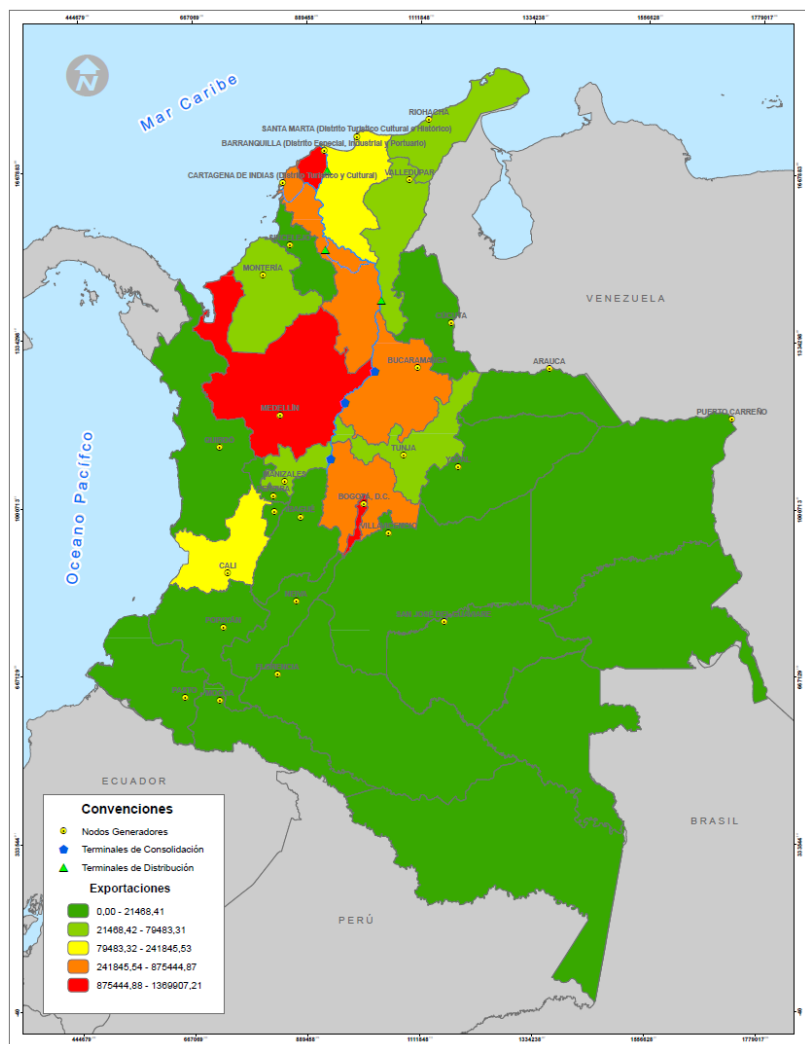


Figura 6. Carga exportada por departamento por los puertos de la Costa Atlántica.
Fuente: Elaboración propia.

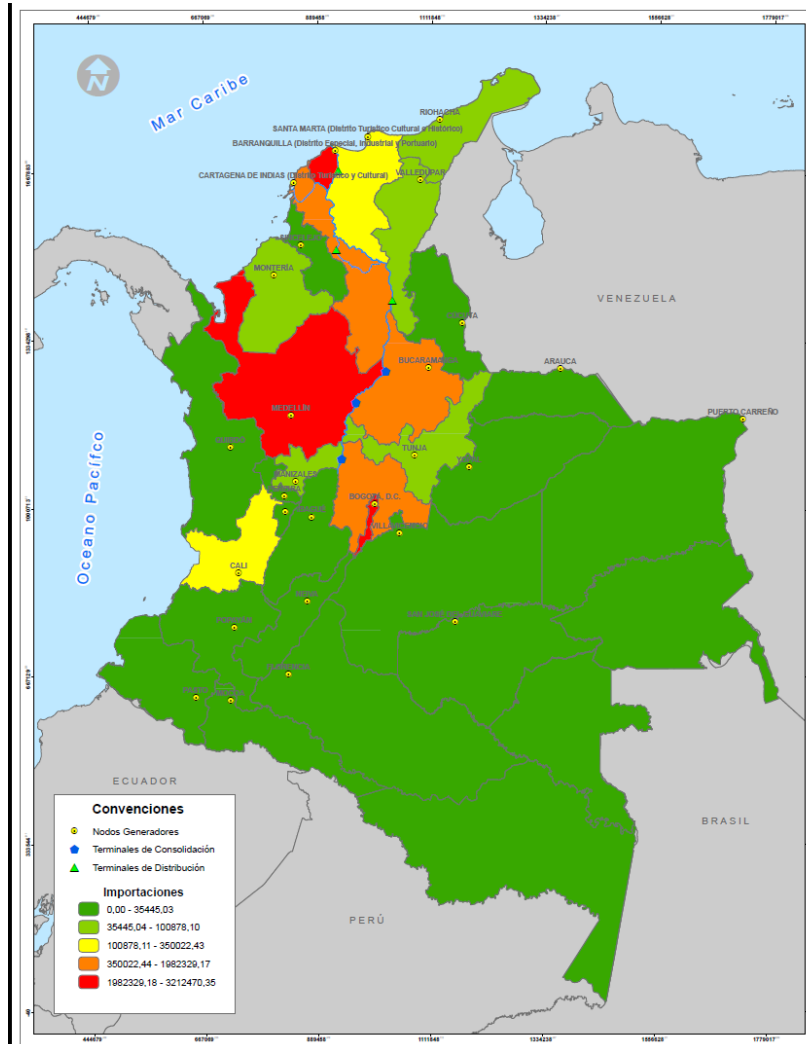


Figura 7. Carga exportada por departamento por los puertos de la Costa Atlántica.
Fuente: Elaboración

4.4 Encuesta

Para estimar los valores de los parámetros de costo y tiempo en el modelo de elección discreta se tomaron los resultados de las encuestas de preferencias reveladas y declaradas aplicadas a transportadores de carga [98] con lo que se buscó establecer la disposición al pago de los usuarios enfrentados a elegir entre dos escenarios: la construcción de una calzada sencilla y la construcción de una vía de dos calzadas. Ambos casos implican mejoras de la movilidad y, implícitamente, una reducción de los tiempos de viaje, sin embargo, ante la elección del segundo escenario se debe considerar el pago de peaje.

Las encuestas se diseñaron teniendo en cuenta aspectos como el tipo de camión, características del viaje (origen, destino, tipo, cantidad y forma de envío de la carga) y atributos de las alternativas como el tiempo de viaje o ahorro sobre el tiempo de viaje actual, el costo de transporte (el valor adicional de pagos de peajes sobre el actual), y el tipo de vía luego de la mejora.

En la encuesta de preferencias declaradas se consideraron diferentes niveles por cada atributo. Para el atributo del tiempo de viaje se definieron tres niveles, para el atributo costo del transporte cuatro niveles y para el tipo de vía se establecieron dos niveles (calzada simple o doble). El ahorro en tiempo de viaje se definió como el tiempo en minutos ahorrado en el viaje gracias a la mejora en las condiciones de la vía y el costo adicional es el costo en miles pesos colombianos adicionales a pagar en la vía mejorada.

Dadas las posibles combinaciones entre los niveles de los atributos se generan 24 posibles escenarios, sin embargo, para evitar los efectos que puede ocasionar la fatiga en el usuario encuestado, se realizó un diseño factorial por bloques reduciendo a 6 los escenarios por bloques [98].

Las encuestas fueron aplicadas en cinco (5) puntos estratégicos de la red de transporte de carga nacional tales como Caucasia – Zaragoza (Antioquia), Cisneros – Puerto Berrío (Antioquia), Cali – Buga (Valle del Cauca), Caucasia – Tarazá (Antioquia) y Primavera – Amagá (Antioquia).

5. RESULTADOS

Los modelos de elección e instalación se corrieron en un computador con procesador de 1.7 GHz Intel Core i5 y 8GB de RAM. Para estimar el modelo MNL se hizo uso del software Biogeme y para resolver el problema de optimización fue utilizado el método de búsqueda exhaustiva. En la siguiente sección se presentan los resultados computacionales y la validación del modelo propuesto aplicado a una red logística multimodal en Colombia.

5.1 Modelo Logit Multinomial (MNL)

Acorde a los escenarios planteados en la encuesta de preferencias declaradas (PD), se especificaron modelos Logit Multinomial, MNL, los cuales no aceptan correlación entre alternativas, heterocedasticidad ni variaciones en los gustos [99] para toda la muestra. El modelo escogido hace referencia a un modelo lineal que no incluye constante específica cuya función de utilidad está dada por:

$$V_{qt} = \beta_c * C_{qt} + \beta_t * T_{qt} \quad (24)$$

En la ecuación anterior, las variables se definen de la siguiente manera:

V_{qt} : Utilidad sistemática de la ruta mejorada para el individuo q en la situación de elección t.

La utilidad sistemática de la ruta actual fue fijada en cero.

C_{qt} : Peaje adicional a pagar si se utiliza la ruta mejorada (miles de \$/ton)

T_{qt} : Tiempo de viaje ahorrado al escoger la ruta mejorada (hora);

β_c : es la utilidad marginal del costo

β_t : es la utilidad marginal del ahorro en tiempo de viaje.

La Tabla 4 muestra el resultado obtenido para el modelo MNL calibrado. En la parte superior se muestran los coeficientes estimados y el valor del *test t* y su relación con el valor del *test t robusto* con la que se puede comprobar su significancia estadística. Además, contiene los indicadores generales de ajuste del modelo como la log-verosimilitud y el valor de rho cuadrado ajustado.

Tabla 4. Modelo Logit Multinomial

Parámetro (Notación)	MNL		
	Coeficiente	t-test	Robust t-test
Costo Adicional (β_c)	-0.7	-26.18	-23.07
Ahorro Tiempo (β_t)	1.56	29.05	25.73
Resumen del informe			
Número de observaciones		9946	
Número de personas		9946	
Medidas de bondad de ajuste			
Log-verosimilitud inicial		-6894.042	
Log-verosimilitud final		-6397.491	
Rho cuadrado		0.073	
Rho cuadrado ajustado		0.073	

En el modelo se esperaba que el coeficiente de la variable “Costo” (-0.332) se obtendría con un signo negativo porque es previsible que ante la alternativa de una mejora en la infraestructura existente se imponga el cobro de una tarifa adicional y el usuario evalúe otras alternativas. En cuanto al signo del coeficiente de la variable “tiempo” (1.44) se presume que sea positivo ya que representa un ahorro en el tiempo de viaje lo cual es una atracción para el usuario.

Además, a partir del modelo anterior, se utilizaron los coeficientes de los parámetros considerados para estimar el Valor Subjetivo del Tiempo de Viaje para el Transporte de Carga (VSTVC). El VSTVC está definido por la siguiente ecuación:

$$VSTVC = \frac{\partial V_{qt} / \partial T_{qt}}{\partial V_{qt} / \partial C_{qt}} = \frac{\beta_t}{\beta_c}$$

Para este caso, el VSTVC corresponde a **2,228.58 \$COP/(hora/ton)**. Este valor será utilizado en el modelo de ubicación de instalaciones al ser incluido en la función de utilidad para cada una de las alternativas de rutas para el transporte de carga considerando una red logística multimodal y de esta manera resaltar el papel que juega el tiempo de transporte en la evaluación de rutas alternativas de transporte [14].

5.2 Modelo de ubicación de instalaciones

Para encontrar la solución al problema, se utilizó el método de búsqueda exhaustiva con el fin de dar al modelo un enfoque práctico, que permite obtener un resultado con menor complejidad, pero que implica un mayor análisis, manejo de la base de datos y atención del investigador, por lo que puede requerir altos tiempo para la verificación de datos y resultados.

En el proceso de evaluación se plantearon posibles escenarios en donde se incluyó la posibilidad de no abrir ninguna instalación y todas las posibles combinaciones entre los diferentes tipos de instalaciones *hub* a ser abiertas. La solución escogida es aquel *hub* o combinación de terminales tipo *hub* que minimiza el costo total del sistema.

Inicialmente, se analizó el efecto que se produce en el sistema de transporte multimodal debido a la variación del número de terminales q a ser abiertas. La Tabla 5 muestra los costos totales mínimos del sistema para cada valor q discriminados por costos fijos, costos de envío y costos externos.

Considerando que el modelo de elección de terminales logísticas incluye la valoración del tiempo, de los resultados obtenidos, se puede concluir que el costo mínimo se obtiene cuando cuatro (4) instalaciones son abiertas: Barrancabermeja, Puerto Berrio, La Dorada y Gamarra.

Tabla 5. Costo mínimo de la red de transporte multimodal

Costo Total de Transporte Multimodal (Millones de Pesos)					
q	Costo Total	Costos Fijos	Costos de Transporte	Costos Externos	Hubs
0	\$ 2,190,208	\$ -	\$ 2,189,748	\$ 459	Ninguno
1	\$ 2,012,252	\$ 2,460	\$ 2,009,338	\$ 454	Ponedera
2	\$ 1,967,090	\$ 2,700	\$ 1,964,001	\$ 389	La Dorada, Gamarra
3	\$ 1,923,016	\$ 3,900	\$ 1,918,721	\$ 396	Pto. Berrio, La Dorada, Gamarra
4	\$ 1,907,635	\$ 5,400	\$ 1,901,843	\$ 393	Barrancabermeja, Pto. Berrio, La Dorada, Gamarra
5	\$ 1,908,908	\$ 6,600	\$ 1,901,915	\$ 393	Barrancabermeja, Pto. Berrio, La Dorada, Magangue, Gamarra
6	\$ 1,909,906	\$ 7,560	\$ 1,901,955	\$ 391	Barrancabermeja, Pto. Berrio, La Dorada, Magangue, Ponedera, Gamarra

De la tabla anterior se infiere que, a medida que aumenta el número de instalaciones, mayores son los costos fijos incurridos, asociados a costos de alquiler, servicios públicos, seguros, entre otros, mientras que los costos asociados al transporte y a las externalidades disminuyen debido al uso del transporte multimodal, tal como se espera en una curva típica. En este caso, instalar más instalaciones afectará los costos, aun cuando la asignación se realice de manera

eficiente considerando que el modelo de elección discreta asigna la distribución por las rutas que presenten menores costos generalizados.

En este orden de ideas, tal como se presenta en la Figura 8 la red con cuatro (4) terminales logísticas logra capturar el 60.24% de la carga transportada representado, principalmente, por el transporte desde los puntos de generación de carga hacia el Puerto de Cartagena. Esta alternativa involucra la conexión multimodal entre terminales logísticas a través del Sistema Ferroviario Central, destacando que los envíos procedentes Bogotá, el Eje Cafetero y la zona de los Llanos Orientales.

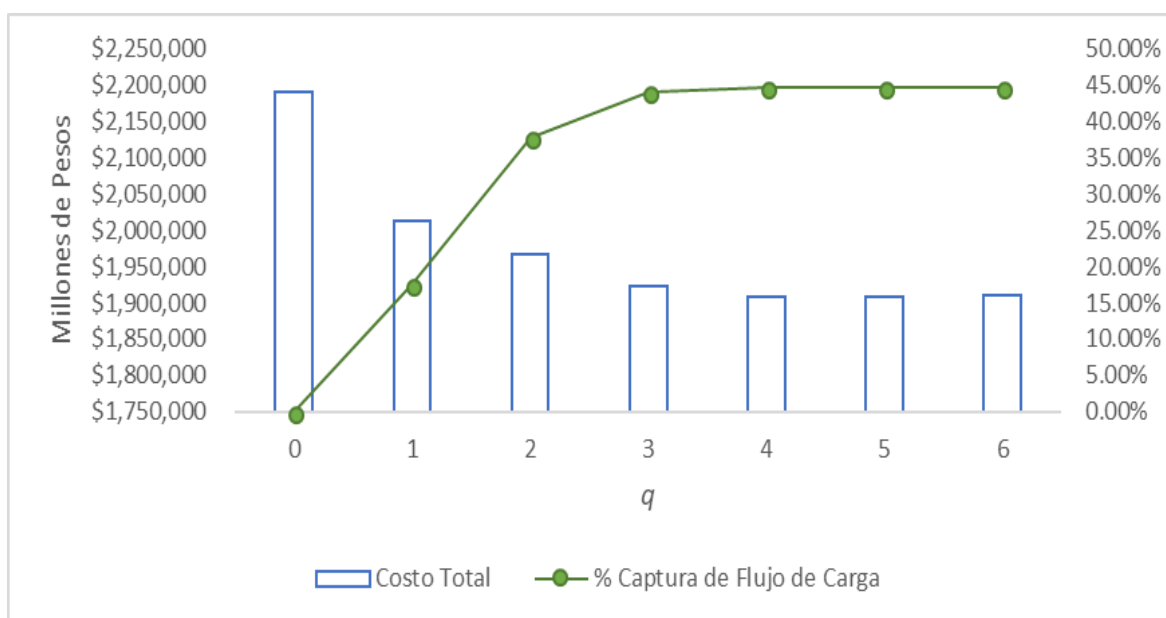


Figura 8. Costos totales de la red Vs. Porcentaje de Captura de Carga

Los resultados evidencian que la carga generada en la zona de la Costa Atlántica será transportada utilizando la alternativa de envío directo hacia los Puertos mientras que la carga generada en la zona de Antioquia y el Occidente del país registra una alta participación de los movimientos de carga realizados por la alternativa de Puerto Berrío que para el caso de los Puertos de Barranquilla y Cartagena se realizaría por transporte carretero mientras que para el Puerto de Santa Marta el modo de transporte es el férreo.

Por otra parte, se tiene que las alternativas de transporte que resultan atractivas son las conexiones entre las terminales de Barrancabermeja – Gamarra, Puerto Berrío – Gamarra y La Dorada – Gamarra, representando esta última el 29.19% del movimiento de carga. La

alternativa de uso de una sola terminal logística y el resto de las conexiones posibles entre las terminales seleccionadas reflejan poca atracción de carga. Barrancabermeja contribuye con el 0.34% mientras que Puerto Berrío, La Dorada y Gamarra mueven por sí solas el 6.07%, 0,49% y 0.49% respectivamente. La alternativa Barrancabermeja – Gamarra permite el movimiento del 4.04% y por la de Puerto Berrío – Gamarra se movería el 4.05%.

Considerando que el 55.31% de la carga será ruteada por envíos directos haciendo uso del transporte terrestre y las conexiones entre terminales implican un transporte férreo y carretero, se concluye que, al incluir el valor del tiempo en el modelo de optimización, las rutas que contemplan alternativas de transporte fluvial a través del Río Magdalena, por su poca velocidad de operación, incurran en grandes tiempos de viaje y resulten poco atractivas en el proceso de elección de las instalaciones.

Por su parte, en la Figura 9 se observa que, al incluir cuatro (4) terminales logísticas en la red de transporte de mercancías, los costos totales logísticos disminuyen hasta un 12.9%, condiciones que impulsarían el comercio exterior reduciendo los costos generalizados de transporte en los corredores logísticos, podrían generar dinámica local para mejorar la logística del país y fomentarían el multimodalismo.

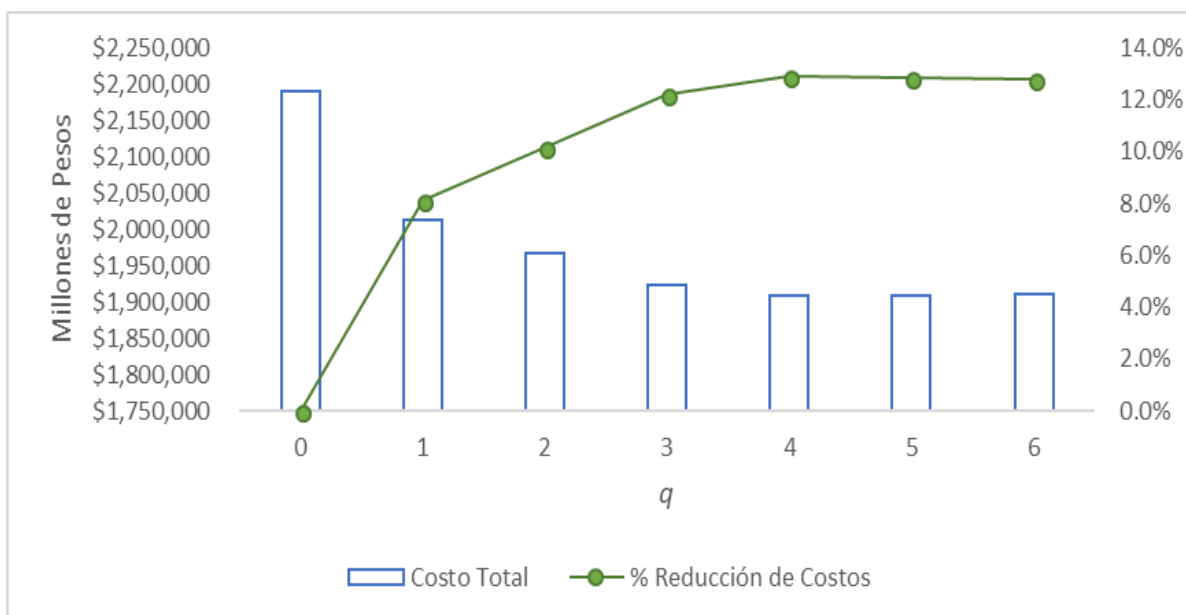


Figura 9. Porcentaje de Reducción de Costos totales de la red

5.3 Análisis de sensibilidad

Para evaluar la sensibilidad del modelo propuesto, se definieron seis (6) escenarios en los que diferentes parámetros fueron variados con el fin de analizar su impacto en los costos totales de transporte de carga, así como en la localización de terminales y asignación de las mismas. Los parámetros que fueron objeto de análisis fueron:

- La velocidad promedio de navegación por el río: Dado que las obras de encauzamiento del Río Magdalena serán ejecutadas de manera progresiva, se plantearon diferentes escenarios para la asignación de tiempos de viaje fluvial. Las obras contempladas deberían garantizar navegación las 24 horas del día mientras que hoy solo se puede desarrollar en horas con luz.
- Los factores de descuento por uso de las terminales propuestas
- El valor del tiempo percibido por el usuario.

A continuación, en la Tabla 6 se presentan los diferentes escenarios planteados.

Tabla 6. Escenarios - Análisis de Sensibilidad

Escenario	Velocidad promedio de navegación río	Factor de Descuento	Valor del Tiempo
Escenario 1	10 km/h	$\phi = 0.9 - \delta = 0.95$	\$ 2228,57
Escenario 2	15 km/h	$\phi = 0.9 - \delta = 0.95$	\$ 2228,57
Escenario 3	5 km/h	$\phi = 0.7 - \delta = 0.85$	\$ 2228,57
Escenario 4	10 km/h	$\phi = 0.7 - \delta = 0.85$	\$ 2228,57
Escenario 5	15 km/h	$\phi = 0.7 - \delta = 0.85$	\$ 2228,57
Escenario 6	10 km/h	$\phi = 0.9 - \delta = 0.95$	\$ 0

A partir de los anteriores escenarios planteados, se calcularon los costos mínimos totales de la red de transporte multimodal según el número de terminales logísticas a abrir. Los resultados presentados en la Tabla 7 muestran que para cinco (5) de los seis (6) escenarios planteados, el costo mínimo se obtiene cuando se abren cuatro (4) terminales logísticas, concordando con el escenario base de modelación. Sin embargo, para el escenario en el que el valor del tiempo de viaje toma el valor de cero (0), el comportamiento de la elección difiere del escenario base, obteniendo el costo mínimo al abrir cinco (5) terminales logísticas (Barrancabermeja, Puerto Berrío, La Dorada, Magangué y Gamarra) en donde a través de las

conexiones fluviales y férreas entre el par de terminales logísticas fluye el mayor porcentaje de la carga.

Tabla 7. Costo Total de Transporte Multimodal por escenario planteado.

q	Costo Total de Transporte Multimodal (Millones de Pesos)							
	Escenario Base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	
0	\$ 2,190,208	\$ 2,190,208	\$ 2,190,208	\$ 2,190,208	\$ 2,190,208	\$ 2,190,208	\$ 2,190,208	
1	\$ 2,031,665	\$ 2,031,665	\$ 2,032,257	\$ 2,017,085	\$ 2,017,085	\$ 2,016,157	\$ 946,951	
2	\$ 1,967,090	\$ 1,967,090	\$ 1,963,355	\$ 1,875,366	\$ 1,875,366	\$ 1,875,353	\$ 855,507	
3	\$ 1,923,016	\$ 1,923,016	\$ 1,919,157	\$ 1,821,578	\$ 1,821,578	\$ 1,821,742	\$ 799,218	
4	\$ 1,907,635	\$ 1,907,635	\$ 1,903,626	\$ 1,803,149	\$ 1,803,149	\$ 1,803,314	\$ 782,032	
5	\$ 1,908,908	\$ 1,908,908	\$ 1,904,895	\$ 1,804,167	\$ 1,804,167	\$ 1,804,506	\$ 779,443	
6	\$ 1,909,906	\$ 1,909,906	\$ 1,906,420	\$ 1,805,370	\$ 1,805,370	\$ 1,805,709	\$ 780,610	

Considerando la solución óptima para cada uno de los escenarios planteados, se realizó un análisis para observar la atracción de carga por las terminales logísticas. En la Figura 10 se observa que al variar el parámetro de la velocidad promedio de navegación fluvial solo se registra un aumento del 1.61% de la atracción de carga del sistema de transporte multimodal. Por el contrario, cuando se varían los parámetros φ y δ asociados al uso de terminales logísticas y cuando se hace el valor del tiempo cero (0) se presentan incrementos del 14.47% y 15.81%, respectivamente.

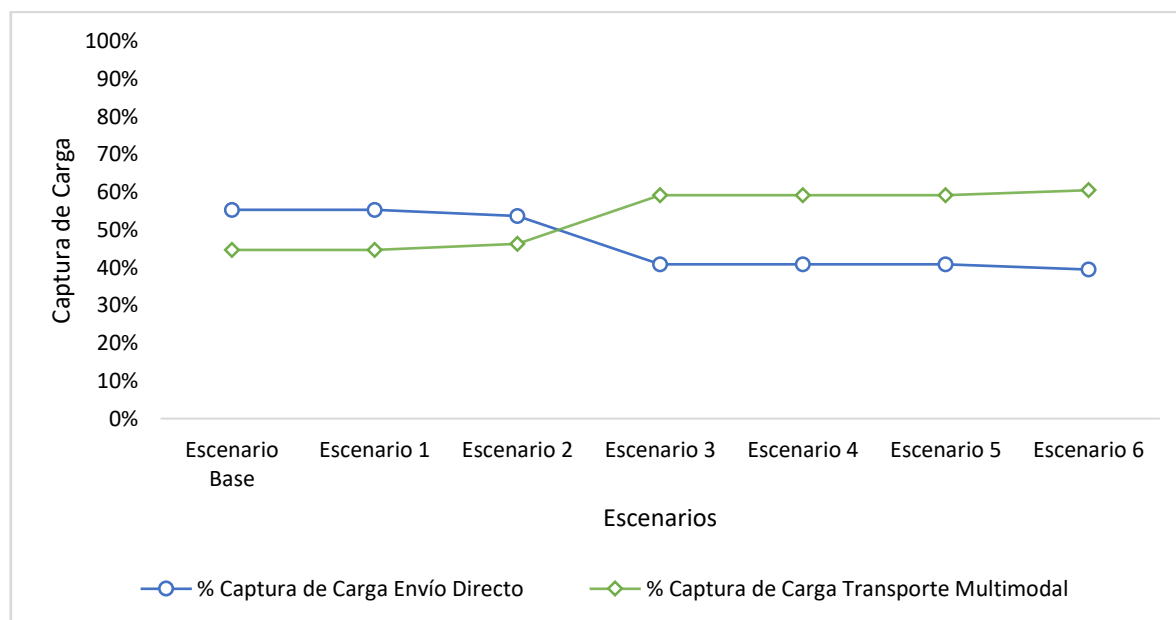


Figura 10. Porcentaje de atracción de carga

Adicionalmente, se observó que, para el escenario base y los escenarios en que se mantuvieron los parámetros φ y δ como 0.9 y 0.95, el puerto que mayor atracción de carga representa para la red de transporte es el Puerto de Santa Marta seguido por el Puerto de Barranquilla con un 74.12% y 40.29% respectivamente. Sin embargo, en los escenarios en los que estos parámetros y el valor del tiempo fueron variados, los Puerto de Santa marta y Cartagena se ubicaron en la primera y segunda posición con 74.21% y 64.85%, respectivamente.

Porcentaje de Atracción de Carga de Terminales Logísticas			
Escenario	Pto. Barranquilla	Pto. Cartagena	Pto. Santa Marta
Escenario Base	40,29%	36,90%	74,12%
Escenario 1	40,29%	36,90%	74,12%
Escenario 2	40,30%	40,24%	74,12%
Escenario 3	44,29%	64,14%	74,16%
Escenario 4	44,29%	64,14%	74,16%
Escenario 5	44,29%	64,15%	74,16%
Escenario 6	47,23%	64,85%	74,21%

6. CONCLUSIONES

Este proyecto analiza el impacto del uso de terminales logísticas multimodales en el contexto de redes de transporte tipo *hub*. La investigación se basa en el desarrollo de un modelo de programación entera no lineal que incorpora modelos *logit* para representar el comportamiento de competencia entre las alternativas, y de esta manera, minimizar los costos totales entendidos como los costos fijos de operación de un *hub*, los costos de transporte, costos de conectividad modal y costos por externalidades en una red multimodal carretera-río-ferrocarril. Cabe destacar que, a diferencia de los modelos tradicionales, el modelo propuesto asume los costos de transporte de carga como el costo generalizado de transporte, es decir, se analiza el costo de envío y el costo del tiempo empleado para realizar dicho viaje. El costo de envío incluye el costo de movilizar la carga por el modo de transporte seleccionado y el costo de transbordo, cuando aplique. Así mismo, el tiempo hace referencia al tiempo de viaje de la mercancía y al tiempo de transbordo entre terminales, cuando sea necesario.

El modelo fue aplicado a la red de transporte de Colombia considerando la instalación de terminales logísticas multimodales en las cuales cada una de ellas tiene acceso a más de un modo de transporte. Para el estudio se consideró una red de transporte multimodal conformada por veintiocho (28) nodos generadores de carga que corresponden a los departamentos que realizan operaciones por los principales puertos de comercio exterior del Caribe colombiano y tres (3) nodos atractores de carga que son asignados a los principales puertos marítimos de la costa Atlántica por los cuales ingresa y/o sale la mercancía del país. Como alternativas para la ubicación de las terminales de consolidación de carga, se contemplaron tres (3) posibles alternativas que corresponden a sitios de alta concentración de carga en el interior del país y que tienen conexión con el río Magdalena y/o la red férrea del Atlántico con el fin de incentivar el transporte multimodal en el país. De igual forma, se asumieron tres (3) alternativas para los centros de distribución pensados como sitios que permitan la descongestión de los puertos, rápida distribución y que también cuenten con conexión a las redes mencionadas anteriormente.

Los resultados obtenidos muestran que, al incluir terminales logísticas multimodal en los corredores de transporte de carga que unan a los puertos con los centros de producción y

consumo, se reducen los costos totales de transporte de mercancía. Adicionalmente, señalan que la localización de terminales está directamente relacionada con los parámetros de la red, en este caso, la velocidad del río, los factores de descuento mediante el uso de las alternativas propuestas y el valor del tiempo de viaje. También permiten deducir que, cuando se contempla el valor del tiempo, las terminales logísticas seleccionadas son aquellas que ofrecen conectividad modal entre el transporte terrestre y el férreo mientras que, cuando este costo no es valorado, las terminales logísticas seleccionadas son las que se encuentran en posiciones geográficas estratégicas y que cuentan con integración de los modos de transporte: fluvial y férreo para transporte entre terminales.

Lo anterior permite concluir que la instalación de terminales logísticas como centros de consolidación de carga en la red de transporte multimodal contribuye a impulsar el comercio exterior y reducir los costos generalizados de transporte en los corredores logísticos y transversales existentes. De igual forma, se reducen los fletes de transporte de carga, se induce y se generan nuevas cargas, y se facilita la multimodalidad en la logística.

Para futuras investigaciones se destaca incluir restricciones de capacidad en el modelo asociadas a las probabilidades de elección. Además, proponer heurísticas para la solución de problemas que exijan mayor esfuerzo computacional para la optimización del modelo. A pesar de que la demanda de transporte es un dato en este modelo, se propone para trabajos futuros, incluir políticas de precios considerando que estas podrían tener un impacto en la demanda de transporte.

En este trabajo, los costos de las externalidades fueron incluidos como un promedio de los costos de congestión, accidentes, polución del aire y emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Sin embargo, la inclusión de externalidades no se limita al CO₂, también se podrían incluir otros gases de efecto invernadero tales como SO_x, NO_x e impactos sociales tales como ruido. Los usuarios del modelo podrían establecer el objetivo de diseño de acuerdo con la aplicación del modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Arnold, D. Peeters, I. Thomas, and H. Marchand, “Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre reseaux de transport: formulation et extensions,” *Can. Geogr. / Le Geogr. Can.*, vol. 45, no. 3, pp. 427–436, 2001.
- [2] Y. Kayikci, “A conceptual model for intermodal freight logistics centre location decisions,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 6297–6311, 2010.
- [3] B. Slack, “Intermodal transportation in North America and the development of inland load centers,” *Prof. Geogr.*, vol. 42, no. 1, pp. 72–83, 1990.
- [4] R. Ishfaq and C. R. Sox, “Intermodal logistics: The interplay of financial, operational and service issues,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 46, no. 6, pp. 926–949, 2010.
- [5] C. C. de Carvalho, R. M. Branski, O. F. Lima Jr., and E. W. Rutkowski, “Atributos para caracterização de plataformas logísticas: estudo de casos na Espanha, Itália e Dinamarca,” *Transportes*, vol. 21, no. 1, p. 23, 2013.
- [6] B. Gajšek, M. Lipičnik, and M. Šimenc, “The logistics platform disambiguation,” vol. 2, no. 1, pp. 69–80, 2012.
- [7] A. F. Dubke, F. R. N. Ferreira, and N. D. Pizzolato, “Plataformas Logísticas : características e tendências para o Brasil,” *XXIV Encontro Nac. Eng. Produção - Florianópolis, SC*, pp. 841–848, 2004.
- [8] G. Leal, Erick; Perez, “Plataformas Logísticas : Elementos Conceptuales,” *Cepal*, p. 4, 2009.
- [9] P. C. Duarte, “Desenvolvimento de um mapa estratégico para apoiar a implantação de uma plataforma logística,” 2004.
- [10] Ø. STOKLAND, A. B. SUND, and T. NETLAND, “Challenges in Intermodal Logistics Networks and - a Norwegian Viewpoint,” no. 4, pp. 1–20.
- [11] T. G. Crainic and T. Bektas, “A Brief Overview of Intermodal Transportation,” *Logist. Eng. Handb.*, no. January, pp. 1–16, 2007.

- [12] T. E. S. Hanssen, "The influence of interview location on the value of travel time savings," *Transportation (Amst)*., vol. 39, no. 6, pp. 1133–1145, 2012.
- [13] M. SteadieSeifi, N. P. Dellaert, W. Nuijten, T. Van Woensel, and R. Raoufi, "Multimodal freight transportation planning: A literature review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 233, no. 1, pp. 1–15, 2014.
- [14] C. Macharis, E. Pekin, and P. Rietveld, "Location Analysis Model for Belgian Intermodal Terminals: Towards an integration of the modal choice variables," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 20, pp. 79–89, 2011.
- [15] C. Macharis, E. Van Hoeck, E. Pekin, and T. van Lier, "A decision analysis framework for intermodal transport: Comparing fuel price increases and the internalisation of external costs," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 44, no. 7, pp. 550–561, 2010.
- [16] C. Macharis and E. Pekin, "Assessing policy measures for the stimulation of intermodal transport: a GIS-based policy analysis," *J. Transp. Geogr.*, vol. 17, no. 6, pp. 500–508, 2009.
- [17] E. Pekin, C. Macharis, D. Meers, and P. Rietveld, "Location Analysis Model for Belgian Intermodal Terminals: Importance of the value of time in the intermodal transport chain," *Comput. Ind.*, vol. 64, no. 2, pp. 113–120, 2013.
- [18] M. Janic, "Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 12, no. 1, pp. 33–44, 2007.
- [19] D. J. Forkenbrock, "External Costs of Truck and Rail Freight Transportation," *Public Policy*, vol. 35, p. 70, 1998.
- [20] L. G. Márquez Díaz and V. M. Cantillo Maza, "Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de carga para Colombia.," *Ing. y Desarro.*, vol. 2, no. 29, pp. 286–307, 2011.
- [21] A. Korzhenevych *et al.*, *Update of the Handbook on External Costs of Transport*, no. 1. 2014.

- [22] F. Iannone, "The private and social cost efficiency of port hinterland container distribution through a regional logistics system," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 46, no. 9, pp. 1424–1448, 2012.
- [23] D. Ambrosino and A. Sciomachen, "A capacitated hub location problem in freight logistics multimodal networks," *Optim. Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. 875–901, 2016.
- [24] D. Ambrosino, C. Ferrari, A. Sciomachen, and A. Tei, "Intermodal nodes and external costs: Re-thinking the current network organization," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 19, pp. 106–117, 2016.
- [25] A. Ricci and I. Black, "The Social Costs of Intermodal Freight Transport," *Res. Transp. Econ.*, vol. 14, no. 05, pp. 245–285, 2005.
- [26] D. J. Forkenbrock, "Comparison of external costs of rail and truck freight transportation," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 35, no. 4, pp. 321–337, 2001.
- [27] M. Beuthe, "External costs of the Belgian freight traffic: A network analysis of the internalisation," vol. 7, no. 1, pp. 1–21, 2002.
- [28] E. Kreutzberger, C. Macharis, L. Vereecken, and J. Woxenius, "Is Intermodal Freight Transport More Environmentally Friendly Than All-Road Freight Transport? a Review," no. 7, pp. 1–22, 2003.
- [29] B. Sahin, H. Yilmaz, Y. Ust, A. F. Guneri, and B. Gulsun, "An approach for analysing transportation costs and a case study," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 193, no. 1, pp. 1–11, 2009.
- [30] B. F. Santos, S. Limbourg, and J. S. Carreira, "The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness - The case of Belgium," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 34, pp. 230–244, 2015.
- [31] P. Zhang, Rong; Li, "Calculation of External costs of Road and Railway Freight Transportation and Internalization," *Transp. Res. Board 95th Annu. Meet.*, 2016.
- [32] S. Limbourg and B. Jourquin, "Optimal rail-road container terminal locations on the European network," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 45, no. 4, pp.

551–563, 2009.

- [33] M. Mostert, A. Caris, and S. Limbourg, “Intermodal network design: a three-mode bi-objective model applied to the case of Belgium,” *Flex. Serv. Manuf. J.*, pp. 1–24, 2017.
- [34] L. Márquez and V. Cantillo, “Evaluating strategic freight transport corridors including external costs,” *Transp. Plan. Technol.*, vol. 36, no. 6, pp. 529–546, 2013.
- [35] K. Braekers, G. K. Janssens, and A. Caris, “Review on the comparison of external costs of intermodal transport and unimodal road transport,” *Proc. BIVIC-GIBET Transp. Res. Day*, pp. 875–890, 2009.
- [36] M. Mostert and S. Limbourg, “External Costs as Competitiveness Factors for Freight Transport — A State of the Art,” *Transp. Rev.*, vol. 36, no. 6, pp. 692–712, 2016.
- [37] C. C. Lin and S. W. Lin, “Two-stage approach to the intermodal terminal location problem,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 67, pp. 113–119, 2016.
- [38] A. J. Goldman, “Optimal Center Location in Simple Networks,” *Transp. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 212–221, 1971.
- [39] M. E. O’kelly, “Activity Levels at Hub Facilities in Interacting Networks,” *Geogr. Anal.*, vol. 18, no. 4, pp. 343–356, 1986.
- [40] M. E. O’kelly, “The Location of Interacting Hub Facilities,” *Transp. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 92–106, 1986.
- [41] M. E. O’kelly, “A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 32, no. 3, pp. 393–404, 1987.
- [42] J. F. Campbell, “Integer programming formulations of discrete hub location problems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 72, pp. 387–405, 1994.
- [43] B. Tan, Pinar; Kara, “A Hub Covering Model for Cargo Delivery Systems Pinar,” *Networks*, vol. 49, no. 1, pp. 28–39, 2007.
- [44] C. B. Cunha and M. R. Silva, “A genetic algorithm for the problem of configuring a

- hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 179, no. 3, pp. 747–758, 2007.
- [45] C. C. Lin and S. C. Lee, “The competition game on hub network design,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 44, no. 4, pp. 618–629, 2010.
 - [46] R. S. De Camargo and G. Miranda, “Single allocation hub location problem under congestion: Network owner and user perspectives,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 3385–3391, 2012.
 - [47] G. Li, D. Hu, and L. Su, “The Model of Location for Single Allocation Multimodal Hub Under Capacity Constraints,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 96, pp. 351–359, 2013.
 - [48] J. G. Klincewicz, “Heuristics for the p-hub location problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 53, no. 1, pp. 25–37, 1991.
 - [49] S. Gelareh and S. Nickel, “Hub location problems in transportation networks,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 47, no. 6, pp. 1092–1111, 2011.
 - [50] S. Gelareh, S. Nickel, and D. Pisinger, “Liner shipping hub network design in a competitive environment,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 46, no. 6, pp. 991–1004, 2010.
 - [51] M. E. O’Kelly, J. F. Campbell, R. S. de Camargo, and G. de Miranda, “Multiple allocation hub location model with fixed arc costs,” *Geogr. Anal.*, vol. 47, no. 1, pp. 73–96, 2015.
 - [52] R. M. A. Figueiredo, M. E. O’Kelly, and N. D. Pizzolato, “A two-stage hub location method for air transportation in Brazil,” *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 21, no. 2, pp. 275–289, 2014.
 - [53] A. T. Ernst and M. Krishnamoorthy, “PII: so%6-8349(%)ooo11-3 EFFICIENT ALGORITHMS FOR THE UNCAPACITATED SINGLE ALLOCATIONp-HUB MEDIAN PROBLEM,” *Locat. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 139–154, 1996.
 - [54] D. Skorin-Kapov, J. Skorin-Kapov, and M. O’Kelly, “Tight linear programming

relaxations of uncapacitated p-hub median problems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 94, no. 3, pp. 582–593, 1996.

- [55] A. T. Ernst and M. Krishnamoorthy, “Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 104, no. 1, pp. 100–112, 1998.
- [56] A. Marín, L. Cánovas, and M. Landete, “New formulations for the uncapacitated multiple allocation hub location problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 172, no. 1, pp. 274–292, 2006.
- [57] C. Fang, S. Li, and Y.-F. Wu, “Multiple Allocation Hub Location Problem with Flow - Dependent Set-up Cost,” in *Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation*, 2016, vol. 1, pp. 672–678.
- [58] D. Dinler, M. K. Tural, and C. Iyigun, “Heuristics for a continuous multi-facility location problem with demand regions,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 62, pp. 237–256, 2015.
- [59] S. N. Shahin Gelareh, Rahimeh Neamatian Monemi, “Multi-period hub location problems in transportation networks,” *Transp. Res. Part E*, vol. 75, pp. 67–94, 2015.
- [60] M. Zhang, M. Janic, and L. A. Tavasszy, “A freight transport optimization model for integrated network, service, and policy design,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 77, pp. 61–76, 2015.
- [61] A. Alibeyg, I. Contreras, and E. Fernández, “Hub network design problems with profits,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 96, no. June, pp. 40–59, 2016.
- [62] S. Alumur and B. Y. Kara, “Network hub location problems: The state of the art,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 190, no. 1, pp. 1–21, 2008.
- [63] J. F. Campbell and M. E. O’Kelly, “Twenty-Five Years of Hub Location Research - Tags: TRANSPORTATION Science (Periodical) NETWORK hubs,” *Transp. Sci.*, vol. 46, no. 2, pp. 153–169, 2012.

- [64] R. Z. Farahani, M. Hekmatfar, A. B. Arabani, and E. Nikbakhsh, "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 64, no. 4, pp. 1096–1109, 2013.
- [65] Y. M. Bontekoning, C. Macharis, and J. J. Trip, *Is a new applied transportation research field emerging? - A review of intermodal rail-truck freight transport literature*, vol. 38, no. 1. 2004.
- [66] T. G. Crainic and K. H. Kim, "Intermodal Transportation," in *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14, no. C, 2007, pp. 467–537.
- [67] R. S. de Camargo, G. Miranda, and H. P. Luna, "Benders decomposition for the uncapacitated multiple allocation hub location problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 1047–1064, 2008.
- [68] K. Sörensen, C. Vanovermeire, and S. Busschaert, "Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 9, pp. 2079–2090, 2012.
- [69] Q. Meng and X. Wang, "Intermodal hub-and-spoke network design: Incorporating multiple stakeholders and multi-type containers," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 45, no. 4, pp. 724–742, 2011.
- [70] C. C. Lin, Y. I. Chiang, and S. W. Lin, "Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 51, pp. 41–51, 2014.
- [71] J. Guelat, M. Florian, and T. G. Crainic, "A Multimode Multiproduct Network Assignment Model for Strategic Planning of Freight Flows," *Transp. Sci.*, vol. 24, no. 1, pp. 25–39, 1990.
- [72] Y. He, T. Wu, C. Zhang, and Z. Liang, "Author 's Accepted Manuscript hub location problem An improved MIP heuristic for the intermodal hub location problem," *Omega*, vol. 57, pp. 203–211, 2015.
- [73] a. Merrina, a. Sparavigna, and R. a. Wolf, "The intermodal networks: a survey on intermodalism," *arXiv*, vol. physics.so, no. August, p. 11, 2006.

- [74] S. A. Alumur, B. Y. Kara, and O. E. Karasan, "Multimodal hub location and hub network design," *Omega*, vol. 40, no. 6, pp. 927–939, 2012.
- [75] A. I. Mahmutogullari and B. Y. Kara, "Hub Location Problem with Allowed Routing between Nonhub Nodes," *Geogr. Anal.*, vol. 47, no. 4, pp. 410–430, 2015.
- [76] P. Arnold, D. Peeters, and I. Thomas, "Modelling a rail/road intermodal transportation system," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 40, no. 3, pp. 255–270, 2004.
- [77] I. Racunica and L. Wynter, "Optimal location of intermodal freight hubs," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 39, no. 5, pp. 453–477, 2005.
- [78] R. Ishfaq and C. R. Sox, "Hub location-allocation in intermodal logistic networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 210, no. 2, pp. 213–230, 2011.
- [79] A. D. Vasconcelos, C. D. Nassi, and L. A. S. Lopes, "The uncapacitated hub location problem in networks under decentralized management," *Comput. Oper. Res.*, vol. 38, no. 12, pp. 1656–1666, 2011.
- [80] R. Ishfaq and C. R. Sox, "Design of intermodal logistics networks with hub delays," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 220, no. 3, pp. 629–641, 2012.
- [81] V. Marianov, "Location of Hubs in a Competitive Environment," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 114, no. 2, pp. 363–371, 1999.
- [82] B. Wagner, "A note on 'Location of hubs in a competitive environment,'" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 184, no. 1, pp. 57–62, 2008.
- [83] V. Marianov, M. Ríos, and M. J. Icaza, "Facility location for market capture when users rank facilities by shorter travel and waiting times," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 191, no. 1, pp. 30–42, 2008.
- [84] L. G. Ortuzar, Juan de Dios; Willumsen, *Modelling Transport*, Fourth. 2011.
- [85] H. A. Eiselt and V. Marianov, "A conditional p-hub location problem with attraction functions," *Comput. Oper. Res.*, vol. 36, no. 12, pp. 3128–3135, 2009.

- [86] D. L. Huff, "Defining and Estimating a Trading Area," *J. Mark.*, vol. 28, no. 3, pp. 34–38, 1964.
- [87] F. Aros-Vera, V. Marianov, and J. E. Mitchell, "P-Hub approach for the optimal park-and-ride facility location problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 226, no. 2, pp. 277–285, 2013.
- [88] A. Lüer-Villagra and V. Marianov, "A competitive hub location and pricing problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 231, no. 3, pp. 734–744, 2013.
- [89] F. Fotuhi and N. Huynh, "Intermodal network expansion in a competitive environment with uncertain demands," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 285–304, 2015.
- [90] H. C. W. L. Williams, "On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit," *Environ. Plan. A*, vol. 9, no. 3, pp. 285–344, 1977.
- [91] J. Walker, "Extended Discrete Choice Models: Integrated Framework, Flexible Error Structures, and Latent Variables," Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [92] G. G. J. Pinto Ana María, Granada Isabel, Montañez Leopoldo, "Evolución política nacional logística." p. 41, 2016.
- [93] Departamento Nacional de Planeación - DNP, "Reporte global de competitividad 2012 - 2013." 2016.
- [94] Asociación Nacional de Comercio Exterior, "Índice de desempeño logístico 2016." 2016.
- [95] M. de Transporte, "Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga SICE-TAC." [Online]. Available: <http://rndc.mintransporte.gov.co/MenuPrincipal/tabid/204/language/es-MX/Default.aspx?returnurl=%2FDefault.aspx>.
- [96] S. D. Gleave, "Estudio de Demanda de Transporte del Sistema Fluvial del Río Magdalena y evaluación beneficio-costos de la instrumentación de un esquema de

reactivación de la navegación fluvial,” no. 71. 2013.

- [97] L. G. Marquez, “OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE COMBINADO PARA LA EXPORTACIÓN DEL CARBÓN DEL INTERIOR DE COLOMBIA,” *Rev. EIA*, no. 16, pp. 103–113, 2011.
- [98] A. Cajellas, “MODELOS ECONOMÉTRICOS PARA DETERMINAR EL VALOR SUBJETIVO DEL TIEMPO DEL VEHÍCULO DE CARGA: ANÁLISIS DEL CASO COLOMBIANO,” Universidad del Norte, 2016.
- [99] V. M. Cantillo Maza, “MODELACION DE DEMANDA INCORPORANDO UMBRALES MINIMOS DE PERCEPCION Y VALORACION DE ATRIBUTOS,” Pontificia Universidad Católica de Chile, 2004.

ANEXO A. DISTANCIAS ENTRE PAR ORIGEN - DESTINO

Tabla A-1. Distancias entre los nodos i y los nodos j, k y m usando transporte carretero

Origen	Distancia (km)								
	Destino								
	Pto. Baq	Pto. Ctg	Pto. Smr	Barrancabermeja	Puerto Berrio	La Dorada	Magangué	Ponedera	Gamarra
Antioquia1	700	641	797	307	185	244	562	660	482
Antioquia2	898	802	864	397	0	0	0	0	0
Atlántico	7	127	109	612	707	829	268	50	432
Bogotá1	989	993	984	425	345	191	1048	1031	601
Bogotá2	1018	1027	954	398	355	218	1043	0	0
Bolívar1	130	7	233	679	774	888	216	108	501
Bolívar2	123	0	234	0	0	0	0	0	0
Boyacá1	891	946	856	305	261	320	906	889	460
Boyacá2	1104	897	1069	472	384	347	818	0	0
Caldas1	891	832	971	420	331	172	752	851	594
Caldas2	1010	986	988	498	376	0	0	0	0
Cauca1	1245	1185	1358	804	716	558	1106	1205	979
Cauca2	1395	1470	1342	815	727	634	0	0	0
Cesar	291	366	256	476	571	692	346	329	298
Córdoba1	348	277	444	545	422	632	209	307	567
Córdoba2	400	288	505	745	0	582	0	0	0
Cundinamarca1	951	976	916	362	349	191	1057	1040	612
Cundinamarca2	999	1009	964	437	320	218	0	0	0
Chocó	929	870	1026	536	414	472	791	889	711
Huila1	1195	1210	1160	608	520	362	1229	1212	783
Huila2	1298	1274	1263	724	663	347	1099	0	0
La Guajira	265	395	174	654	749	871	515	298	476

Distancia (km)									
Magdalena	138	229	2	566	661	782	350	237	388
Meta1	1315	1324	1280	722	634	305	1161	1145	716
Meta2	1291	1388	1256	700	656	319	0	0	0
Nariño1	1510	1451	1622	1070	982	803	1359	1457	1231
Nariño2	1661	1691	1645	1188	993	880	0	0	0
Norte de Santander1	672	747	637	304	399	527	717	700	271
Norte de Santander2	870	802	0	0	0	277	0	0	0
Quindío1	954	905	1059	511	423	264	815	914	682
Quindío2	1098	1177	1051	524	436	258	0	0	0
Risaralda1	913	854	1023	472	384	265	774	873	647
Risaralda2	1063	1138	1010	520	398	337	0	0	0
Santander	599	735	625	116	211	649	629	612	183
Sucre	232	175	329	630	485	179	93	192	452
Tolima1	1005	1030	1014	419	331	427	1040	1023	594
Tolima2	1095	1064	1153	0	0	472	893	0	0
Valle del Cauca1	1117	1058	1228	677	588	839	979	1078	852
Valle del Cauca2	1268	1343	1214	0	609	507	0	0	0
Arauca	1093	1168	1058	579	674	597	1098	1081	652
Casanare	1116	1191	1081	601	572	680	1101	1084	655
Caquetá	1429	1444	1394	843	754	596	1505	1488	1059
Putumayo	1512	1528	1477	926	838	782	1547	1530	1101
Guaviare	1412	1420	1375	848	749	305	1369	1451	1022

Tabla A-2. Distancia entre los nodos (k,m) y los nodos j por modo de transporte.

Modo de Transporte	Origen	Destino		
		Pto Baq	Pto Ctg	Pto Smr
Terrestre	Barrancabermeja	607	685	571
	Puerto Berrio	694	771	657
	La Dorada	820	898	783
	Magangué	268	226	361
	Ponedera	43	114	136
	Gamarra	448	504	390
Fluvial	Barrancabermeja	630	656	0
	Puerto Berrio	730	756	0
	Magangué	237.9	266	0
	Ponedera	40.1	68	0
	Gamarra	472.7	501	0
Férreo	Barrancabermeja	0	0	525
	Puerto Berrio	0	0	636
	La Dorada	0	0	769
	Gamarra	0	0	364

TablaA-3. Distancia entre los nodos k y m por modo de transporte

Modo de Transporte	Origen	Destino		
		Magangué	Ponedera	Gamarra
Terrestre	Barrancabermeja	658	638	205
	Puerto Berrío	753	733	300
	La Dorada	879	859	426
Fluvial	Barrancabermeja	393.3	591.1	158.5
	Puerto Berrío	491.7	689.5	256.9
Férreo	Barrancabermeja	0	0	160
	Puerto Berrío	0	0	272
	La Dorada	0	0	404

ANEXO B. TIEMPOS DE VIAJE POR MODO DE TRANSPORTE

Tabla B-1. Tiempos de viaje entre los nodos i y los nodos j, k y m usando transporte carretero

	Tiempo (hora)								
	Destino								
	Pto. Baq	Pto. Ctg	Pto. Smr	Barrancabermeja	Puerto Berrio	Puerto Salgar	Magangué	Ponedera	Gamarra
Antioquia1	15.17	11.60	14.17	5.68	3.68	4.43	10.52	12.20	8.05
Antioquia2	15.77	14.57	14.80	6.72	0.00	6.52	0.00	0.00	0.00
Atlántico	0.40	2.70	2.23	9.62	10.97	12.88	4.57	1.20	7.25
Bogotá1	18.00	18.92	16.32	7.58	6.15	4.25	16.63	15.90	9.50
Bogotá2	17.18	19.00	17.20	8.38	7.45	5.17	21.07	0.00	0.00
Bolívar1	2.32	0.33	4.03	10.73	12.12	13.82	3.68	2.13	8.53
Bolívar2	2.70	0.00	4.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boyacá1	16.25	17.45	15.50	6.73	5.83	5.58	15.97	15.35	8.72
Boyacá2	20.80	18.17	20.43	8.83	7.43	6.37	17.03	0.00	0.00
Caldas1	16.43	15.38	16.23	7.48	6.05	3.93	14.38	15.95	9.72
Caldas2	17.30	18.87	18.68	9.60	7.57	0.00	0.00	0.00	0.00
Cauca1	22.05	20.60	22.33	13.25	11.92	10.12	19.63	21.30	15.70
Cauca2	23.30	25.00	23.73	13.87	12.55	11.62	0.00	0.00	0.00
Cesar	4.87	6.50	4.28	7.18	8.55	10.13	5.82	5.60	4.83
Córdoba1	6.15	4.83	8.07	10.68	8.80	11.98	3.65	5.28	9.67
Córdoba2	6.70	5.02	8.82	11.92	0.00	12.27	0.00	0.00	0.00
Cundinamarca1	17.10	19.12	16.43	7.80	6.30	4.25	16.77	16.13	9.65
Cundinamarca2	17.55	19.25	16.78	7.73	6.35	5.07	0.00	0.00	0.00
Chocó	19.13	18.08	20.82	12.27	10.28	10.33	16.92	18.55	14.30
Huila1	18.48	20.38	18.20	9.07	7.77	5.47	18.40	17.67	11.50
Huila2	23.37	20.47	23.00	12.02	12.70	6.17	21.05	0.00	0.00
La Guajira	4.23	6.57	2.73	9.77	11.13	13.13	8.40	5.02	7.50
Magdalena	2.57	4.17	0.13	8.63	10.00	11.80	6.07	1.53	6.22

Tiempo (hora)									
Meta1	23.68	26.00	23.38	14.15	12.90	6.92	20.03	19.72	12.80
Meta2	25.00	25.00	25.00	15.13	14.48	6.93	0.00	0.00	0.00
Nariño1	27.00	26.00	28.00	18.58	17.10	14.93	24.00	26.00	20.35
Nariño2	29.00	30.00	28.00	22.37	17.93	16.67	0.00	0.00	0.00
Norte de Santander1	12.43	13.97	11.75	6.80	8.20	9.82	13.12	12.72	5.72
Norte de Santander2	13.47	14.40	0.00	0.00	0.00	6.05	0.00	0.00	0.00
Quindío1	17.77	17.33	18.27	9.58	8.22	6.15	15.40	17.13	11.80
Quindío2	18.88	20.57	19.70	9.75	8.27	5.95	0.00	0.00	0.00
Risaralda1	17.03	15.90	17.65	8.48	7.10	5.93	14.72	16.30	10.93
Risaralda2	18.30	19.93	19.07	10.02	7.93	5.50	0.00	0.00	0.00
Santander	11.50	13.60	11.52	2.18	3.55	13.32	10.93	10.93	3.57
Sucre	4.15	2.97	5.97	9.75	9.98	3.02	1.62	3.23	7.78
Tolima1	15.95	18.67	15.98	6.62	5.15	8.12	16.13	15.38	8.82
Tolima2	20.40	18.77	21.45	0.00	0.00	9.32	18.37	0.00	0.00
Valle del Cauca1	20.23	18.78	20.20	11.43	10.02	16.63	17.75	19.43	13.60
Valle del Cauca2	21.50	22.63	21.47	0.00	11.60	10.53	0.00	0.00	0.00
Arauca	22.07	23.72	21.52	13.17	14.48	9.42	21.65	21.58	14.52
Casanare	21.32	22.82	20.93	12.40	12.38	11.57	19.63	19.73	12.62
Caquetá	22.78	25.00	22.08	13.10	11.68	10.77	26.00	26.00	18.68
Putumayo	24.00	26.00	23.88	14.80	13.50	4.43	24.00	24.00	17.07
Guaviare	25.00	27.00	24.00	16.48	15.07	6.52	26.00	25.00	18.03

Tabla B-2. Tiempo de viaje entre los nodos k y m y los nodos j por modo de transporte.

Modo de Transporte	Origen	Destino		
		Pto Baq	Pto Ctg	Pto Smr
Terrestre	Barrancabermeja	11.88	13.52	11.15
	Puerto Berrio	12.44	14.23	11.72
	La Dorada	14.11	15.67	13.62
	Magangué	6.78	6.05	8.58
	Ponedera	3.00	4.36	4.78
	Gamarra	10.16	10.66	8.50
Fluvial	Barrancabermeja	128.00	133.20	0.00
	Puerto Berrio	148.00	153.20	0.00
	Magangué	49.58	55.18	0.00
	Ponedera	10.02	15.62	0.00
	Gamarra	96.54	102.14	0.00
Férreo	Barrancabermeja	0.00	0.00	12.50
	Puerto Berrio	0.00	0.00	14.72
	La Dorada	0.00	0.00	17.38
	Gamarra	0.00	0.00	9.28

Tabla B-3. Tiempo de viaje entre terminales logísticas usando transporte fluvial y ferroviario.

Modo de Transporte	Origen	Destino		
		Magangué	Ponedera	Gamarra
Terrestre	Barrancabermeja	12.433	11.967	5.217
	Puerto Berrío	13.45	13.117	6.483
	La Dorada	13.217	15.033	8.183
Fluvial	Barrancabermeja	80.7	120.2	33.7
	Puerto Berrío	100.3	139.9	53.4
Férreo	Barrancabermeja	0	0	5.2
	Puerto Berrío	0	0	7.44
	La Dorada	0.0	0.0	10.1